

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
CRISTHYANO CAVALI DA LUZ

AVALIAÇÃO DA EXATIDÃO ABSOLUTA DE ORTOFOTO OBTIDA POR MEIO DE
DADOS BRUTOS ORIUNDOS DE VEÍCULOS AÉREOS NÃO TRIPULADOS (SISVANT)

CURITIBA
2015

CRISTHYANO CAVALI DA LUZ

AVALIAÇÃO DA EXATIDÃO ABSOLUTA DE ORTOFOTO OBTIDA POR MEIO DE
DADOS BRUTOS ORIUNDOS DE VEÍCULOS AÉREOS NÃO TRIPULADOS (SISVANT)

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Área de Concentração em Fotogrametria, Departamento de Geomática, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciências Geodésicas.

Orientador: Prof. Dr. Alzir Felipe Buffara Antunes

CURITIBA

2015

L979 Luz, Cristhyano Cavali da
Avaliação da exatidão absoluta de ortofoto obtida por meio de dados brutos oriundos de veículos aéreos não tripulados (SISVANT)/ Cristhyano Cavali da Luz. -- Curitiba, 2015.
118f.: il., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Alzir Felipe Buffara Antunes.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná. Setor de Ciências da Terra. Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas
Inclui Bibliografia.

1. Fotografia aérea. 2. Modelo digital de elevação. 3. Ortofotografia. 4. Aerotriangulação. I. Antunes, Alzir Felipe Buffara. II. Título. III. Universidade Federal do Paraná.

CDD 526.982

TERMO DE APROVAÇÃO

CRISTHYANO CAVALI DA LUZ


*“AVALIAÇÃO DA EXATIDÃO ABSOLUTA DE ORTOFOTO OBTIDA
POR MEIO DE DADOS BRUTOS ORIUNDOS DE UM
VEÍCULO AÉREO NÃO TRIPULADO (SISVANT)”*

Dissertação nº 276 aprovada como requisito parcial do grau de Mestre no Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra da Universidade Federal do Paraná, pela seguinte banca examinadora:

Orientador:



Prof. Dr. Alzir Felipe Buffara Antunes
Departamento de Geomática, UFPR



Prof. Dr. Alex Soria Medina
Departamento de Geomática, UFPR



Prof. Dr. Daniel Rodrigues dos Santos
Departamento de Geomática, UFPR

Curitiba, 27 de janeiro de 2015.

***Aos meus pais Jemerson Cavali da Luz e Regiane Maria Anzolin da Luz.
Pela simples presença, pelo inmensurável amor e pela dedicação em todos os momentos.***

AGRADECIMENTOS

A conclusão deste trabalho somente foi possível devido à contribuição direta ou indireta de várias pessoas e instituições:

Primeiramente à Deus, fonte suprema de toda sabedoria e discernimento.

À minha família, meu alicerce. Meus pais Jemerson Cavali da Luz e Regiane Maria Anzolin da Luz, pela educação, pelo incentivo nos momentos difíceis e, principalmente, por sempre estarem presentes. São e sempre serão meu espelho e meu orgulho. Minha irmã Nicole Cavali da Luz pela convivência e carinho. Meu amor Isis M. P. Grande, por dividir espaço com minhas angústias e alegrias advindas do presente trabalho.

Em especial ao Prof. Dr. Alzir Felipe Buffara Antunes pela orientação, confiança, apoio, compreensão e incentivo durante a execução de todo trabalho. Um grande exemplo.

Ao Prof. Dr. Eduardo Ratton, Prof. Dr. Carlos Aurélio Nadal, Prof. Dr. Donizeti Antonio Giusti e Prof^a. MSc. Gilza Blasi, por terem sempre me incentivado nessa jornada de estudos, tendo sido, além de tudo, fundamentais para a viabilização do presente trabalho.

Ao Instituto Tecnológico de Transportes e Infraestrutura (ITTI) por me permitir desenvolver na prática a metodologia aqui proposta.

Aos colaboradores do ITTI pelo convívio, amizade e compreensão diária.

À Fundação de Pesquisas Florestais do Paraná (FUPEF) pelo fomento financeiro que permitiu com que a presente pesquisa fosse concluída com êxito.

Ao Engenheiro Florestal Márcio Polanski e à Softmapping Engenharia, Cartografia e Geoprocessamento Ltda. pela operacionalização da metodologia, através da concessão do VANT.

Ao Eng. Cartógrafo e Agrimensor Rodrigo de Castro Moro pela amizade e companheirismo. Sem sua ajuda seria impossível. Muito obrigado.

*“Se fracassar, ao menos que fracasse ousando grandes feitos, de modo que
a sua postura não seja nunca a dessas almas frias e tímidas que não
conhecem nem a vitória nem a derrota.”*

Theodore Roosevelt

RESUMO

O embarque de sensores em Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT's) para a aquisição de informação espacial, com vistas à elaboração de produtos cartográficos, fotointerpretação e atualização de bases cadastrais, teve um grande avanço a partir do século XXI, através de modernas etapas de processamento digital entre as fotografias aéreas adquiridas com câmeras digitais. Este trabalho teve como objetivo propor uma metodologia capaz de gerar ortofotos, de forma semiautomática, a partir de dados brutos oriundos de um VANT, bem como avaliar sua exatidão absoluta, através de distintas configurações quanto a utilização de pontos de controle para o processamento. Em outras palavras, buscou-se avaliar a aplicabilidade da tecnologia VANT, com vistas à atualização de bases cartográficas. A metodologia previu o estudo da área a ser imageada; a elaboração do plano de voo a ser seguido pelo VANT; a pré-sinalização dos pontos de controle no terreno e, posterior, rastreamento GNSS dos mesmos; a aquisição dos dados e das fotografias aéreas; o processamento das imagens, através de algoritmos computacionais de classificações de padrões e reconstrução tridimensional do terreno, através das operações de aerotriangulação, geração do Modelo Digital de Elevação e das ortofotos. O controle de qualidade considerou as análises estatísticas de tendência e precisão através de pontos de verificação no terreno e o enquadramento das ortofotos pelo Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC). O recobrimento aerofotogramétrico foi realizado com altura de voo média de 300 metros. As fotografias aéreas foram automaticamente obtidas com uma câmera Sony NEX-3 16Mp, com resolução espacial no terreno de 8,9 cm. A melhor configuração obtida considerou 12 pontos de apoio no seu processamento e 15 pontos de verificação. A análise de tendência e de precisão em suas componentes posicionais resultaram em uma carta acurada para a escala 1:10.000 na planimetria. Dessa forma, pode-se concluir que os VANT's de baixo custo podem ser perfeitamente utilizados em mapeamentos temáticos, atualização de bases cartográficas. Entretanto, não apresentam exatidão dos parâmetros de orientação exterior através da determinação direta, extraídos da integração GNSS/INS.

Palavras-chave: Ortofotos. MDE. VANT. Exatidão.

ABSTRACT

The boarding of sensors in Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) for the acquisition of spatial information, with the intention of preparing cartographic products, photo interpretation and updating of databases, had a breakthrough at the beginning of the twenty-first century, by modern processing steps between digital aerial photographs acquired with digital cameras. The present study's aim was to propose a methodology able to generate orthophotos, by a semiautomatic process, from raw data from a UAV, and to evaluate its absolute accuracy, using different settings such as the use of control points for processing. In other words, the study's purpose was to evaluate the applicability of UAV technology, in order to update cartographic databases. The methodology of the study encompassed the area to be imaged, the elaboration of the flight plan to be followed by the UAV, pre-signaling of the control points on the ground and then, the their GNSS tracking, the acquisition of data and aerial photographs, the processing of the images through computer algorithms ratings patterns and the three-dimensional reconstruction of the ground by the operations of aerial triangulation, the generation of Digital Elevation Model and orthophotos. Quality control analysis considered statistical analysis of trends and accuracy through checkpoints on the ground and the framework of the orthophotos Cartographic Accuracy Standard (CAS). The aerophotogrammetric coverage was insured with an average flight height of 300 meters. Aerial photos were automatically taken by a Sony NEX-3 16MP camera, with a spatial resolution on the ground of 8.9 cm. The best obtained configuration considered 12 support points in its processing and 15 checkpoints. The statistical analysis of trends and accuracy in their positional components resulted in an accurate letter for the 1:10.000 scale in planimetry. Thereby, it can be concluded that the low cost UAVs can be perfectly used in thematic mapping, and updates of cartographic databases, however, They lack accuracy of exterior orientation parameters by direct determination, extracted from the GNSS/INS integration.

Key words: Orthophoto. DEM. UAV. Accuracy.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 - MODELOS DE CÂMERAS DIGITAIS DE PEQUENO FORMATO.....	26
FIGURA 2.2 - RELAÇÃO GEOMÉTRICA DA FOTOGRAFIA VERTICAL.	27
FIGURA 2.3 - RELAÇÃO GEOMÉTRICA EM TERRENO IRREGULAR.	28
FIGURA 2.4 - CONDIÇÃO DE COLINEARIDADE E ELEMENTOS DE ORIENTAÇÃO EXTERIOR.	30
FIGURA 2.5 - CONDIÇÃO DE COLINEARIDADE ENTRE OS PONTOS NOS ESPAÇO-IMAGEM E OBJETO.....	32
FIGURA 2.6 - LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS DE GRUBER.	32
FIGURA 2.7 - GRADE REGULAR (ESQUERDA) E GRADE IRREGULAR (DIREITA).	37
FIGURA 2.8 - MÉTODO DIRETO E INVERS DE GERAÇÃO DE ORTOFOTO.	39
FIGURA 3.1 - LOCALIZAÇÃO DO MUNICÍPIO DE SÃO DESIDÉRIO, EXTREMO OESTE BAIANO.	44
FIGURA 3.2 - ÁREA DE ESTUDO COMPREENDENDO O SISTEMA CÁRSTICO DO RIO JOÃO RODRIGUES (SCRJR) E RODOVIA FEDERAL BR-135/BA, NO MUNICÍPIO DE SÃO DESIDÉRIO/BA.....	45
FIGURA 3.3 - ORGANOGRAMA DOS MÉTODOS EMPREGADOS.....	47
FIGURA 3.4 - RELAÇÃO ENTRE A DISTÂNCIA FOCAL DA CÂMARA, TAMANHO DO PIXEL E ALTURA DE VOO, PARA O CÁLCULO DO GSD.....	48
Figura 3.5 - EXEMPLO DE SOBREPOSIÇÃO LONGITUDINAL E LATERAL PARA 3 FAIXAS DE VOO.	51
FIGURA 3.6 - VERIFICAÇÃO, APÓS A REALIZAÇÃO DO IMAGEAMENTO AÉREO, DÀS SOBREPOSIÇÕES LATERAL (A) E LONGITUDINAL (B) PLANEJADAS.	51
FIGURA 3.7 - PLANO DE VOO E TOMADA DAS FOTOGRAFIAS AÉREAS DE PEQUENO FORMATO.....	52
FIGURA 3.8 - PRÉ-SINALIZAÇÃO DA ÁREA DE INTERESSE COM CAL E LONA.....	53
FIGURA 3.9 - IDENTIFICAÇÃO DA PRÉ-SINALIZAÇÃO NAS FOTOGRAFIAS AÉREAS.	54
FIGURA 3.10 - RASTREIO GNSS PELO MÉTODO RELATIVO ESTÁTICO REALIZADO NA ÁREA DE ESTUDO.	55
FIGURA 3.11 - DISTRIBUIÇÃO DOS PONTOS DE APOIO NA ÁREA DE ESTUDO.	56
FIGURA 3.12 - SISVANT MODELO SMARTBIRD X-260. (A) VISTA DA FACE SUPERIOR; (B) VISTA DA FACE INTERIOR.	57

FIGURA 3.13 – (A) CÂMERA DIGITAL CONVENCIONAL (NÃO MÉTRICA) SONY NEX-3; (B) ILUSTRAÇÃO DO FLASH.	58
FIGURA 3.14 - SISTEMA DE LANÇAMENTO DO SISVANT ATRAVÉS DE UMA CATAPULTA E ELÁSTICO. (A) OPERADOR AGUARDANDO POSICIONAMENTO DO AUXILIAR PARA DECOLAGEM; (B) SUPORTE EM PVC.	59
FIGURA 3.15 - ORGANOGRAMA DAS ETAPAS DE PROCESSAMENTO DAS IMAGENS.	60
FIGURA 3.16 - PROCESSO DE RECONSTRUÇÃO 3D A PARTIR DE AEROFOTOGRAMETRIA.	62
FIGURA 3.17 - ALGORITMO PARA ALINHAMENTO DAS FOTOGRAFIAS SENDO PROCESSADO.	62
FIGURA 3.18 - PONTOS HOMÓLOGOS ENTRE AS FOTOGRAFIAS AÉREAS.	62
FIGURA 3.19 - MÉTODO DO AJUSTAMENTO POR FEIXES PERSPECTIVOS.	63
FIGURA 3.20 - ESPAÇO-IMAGEM E ESPAÇO-OBJETO, CONDIÇÃO DE COLINEARIDADE E ELEMENTOS DE ORIENTAÇÃO EXTERIOR.	64
FIGURA 3.21 - CONSTRUÇÃO DO MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO. EM DESTAQUE: CAVERNAS DO SISTEMA CÁRSTICO DO RIO JOÃO RODRIGUES.....	66
FIGURA 3.22 - MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO GERADO.	66
FIGURA 3.23 - EXPORTAR A ORTOFOTO PARA O FORMATO DESEJADO.	67
FIGURA 3.24 - PONTOS DE APOIO ADICIONADOS COMO MARCADORES NO AGISOT PHOTOSCAN.....	68
FIGURA 3.25 - EXEMPLO DO PROCESSO MANUAL DA CORRETA IDENTIFICAÇÃO DA COORDENADA OBTIDA VIA RASTREIO TERRESTRE COM A PRÉ-SINALIZAÇÃO.	69
FIGURA 4.1 - EIXO DE ROTAÇÃO DO SISVANT E FOTOGRAFIA AÉREA INCLINADA.	74
FIGURA 4.2 - PROCESSO DE ALINHAMENTO DAS FOTOGRAFIAS.	76
FIGURA 4.3 - GRADE TIN SEM PONTOS DE APOIO. DETALHE PARA SISTEMA CÁRSTICO DO RIO JOÃO RODRIGUES COM MENOR DENSIFICAÇÃO DA NUVEM DE PONTOS.....	77
FIGURA 4.4 - GRADE TIN COM PONTOS DE APOIO. DETALHE PARA SISTEMA CÁRSTICO DO RIO JOÃO RODRIGUES COM MAIOR DENSIFICAÇÃO DA NUVEM DE PONTOS.....	77
FIGURA 4.5 - VISTA EM PLANTA DA ÁREA DE ESTUDO.	78

FIGURA 4.6 - PERFIL LONGITUDINAL DA ÁREA DE ESTUDO, REPRESENTADO PELAS FEIÇÕES CÁRSTICAS.	78
FIGURA 4.7 - PERFIL DA CAVIDADE SUBTERRÂNEA PRESENTE NA ÁREA DE ESTUDO.....	79
FIGURA 4.8 - PERFIL DO DOLINAMENTO PRESENTE NA ÁREA DE ESTUDO.	79
FIGURA 4.9 - IDENTIFICAÇÃO DA HIDROGRAFIA CÁRSTICA POSSIBILITADA PELA REALIZAÇÃO DO IMAGEAMENTO AÉREO.	80
FIGURA 4.10 - ATUALIZAÇÃO DA GEOLOGIA LOCAL PROPICIADA ATRAVÉS DO IMAGEAMENTO VANT REALIZADO NA ÁREA DE ESTUDO.....	81
FIGURA 4.11 - DIFERENÇAS NO PROCESSAMENTO DAS ORTOFOTOCARTAS GERADAS PELO AGISOFT PHOTOSCAN, COM E SEM APOIO DE CAMPO.	83

LISTA DE TABELAS

TABELA 3.1 - PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DO SISVANT.	57
TABELA 3.2 - ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS - SONY NEX-3.....	57
TABELA 4.1 - RESULTADOS DA ANÁLISE DE TENDÊNCIA PARA AS CONFIGURAÇÕES Nº 01 E 02.....	89
TABELA 4.2 - RESULTADOS DA ANÁLISE DE TENDÊNCIA PARA AS CONFIGURAÇÕES Nº 03 E 04.....	89

LISTA DE QUADROS

QUADRO 2.1- PADRÃO DE EXATIDÃO CARTOGRÁFICA DA PLANIMETRIA DOS PRODUTOS CARTOGRÁFICOS DIGITAIS.....	42
QUADRO 2.2- PADRÃO DE EXATIDÃO CARTOGRÁFICA ALTIMÉTRICA DOS PONTOS COTADOS E DO MDT, MDE E MDS PARA A PRODUÇÃO DE PRODUTOS CARTOGRÁFICOS DIGITAIS.	42
QUADRO 2.3- PADRÃO DE EXATIDÃO CARTOGRÁFICA DA ALTIMETRIA (CURVAS DE NÍVEL) DOS PRODUTOS CARTOGRÁFICOS DIGITAIS.....	42
QUADRO 3.1 - EQUIPAMENTOS E MATERIAIS UTILIZADOS NO ESTUDO.	46
QUADRO 4.1 - TRATAMENTO ESTATÍSTICO DOS VALORES ESTIMADOS DAS ATITUDES.	75
QUADRO 4.2 - COORDENADAS (EM METROS) DOS 12 PONTOS DE APOIO (UTM)..	84
QUADRO 4.3 – COORDENADAS (EM METROS) DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO (UTM).....	84
QUADRO 4.4 - COORDENADAS (EM METROS) OBTIDAS NAS ORTOFOTOS GERADAS.	85
QUADRO 4.5 - RESUMO ESTATÍSTICO DO PROCESSAMENTO SEM GCP (EM METROS).	85
QUADRO 4.6 - RESUMO ESTATÍSTICO DO PROCESSAMENTO COM 12 GCP (EM METROS).	86
QUADRO 4.7 - COORDENADAS (EM METROS) DOS 07 PONTOS DE APOIO (UTM)..	86
QUADRO 4.8 - COORDENADAS (EM METROS) DOS 20 PONTOS DE APOIO (UTM)..	87
QUADRO 4.9 - COORDENADAS OBTIDAS NAS ORTOFOTOS GERADAS.....	87
QUADRO 4.10 - RESUMO ESTATÍSTICO DO PROCESSAMENTO COM 20 PONTOS DE APOIO (EM METROS).	88
QUADRO 4.11 - RESUMO ESTATÍSTICO DO PROCESSAMENTO COM 7 PONTOS DE APOIO (EM METROS).	88
QUADRO 4.12 - ERRO PADRÃO (EP) DO PEC-PCD NAS DISTINTAS ESCALAS E CLASSES (PLANIMETRIA).....	90
QUADRO 4.13 - ERRO PADRÃO (EP) DO PEC-PCD NAS DISTINTAS ESCALAS E CLASSES (ALTIMETRIA).....	91
QUADRO 4.14 - VARIÂNCIAS AMOSTRAIS CALCULADAS ATRAVÉS DO EP PARA A PLANIMETRIA E ALTIMETRIA.	91

QUADRO 4.15 - CÁLCULO ESTATÍSTICO PARA A COORDENADA X.....	91
QUADRO 4.16 - CÁLCULO ESTATÍSTICO PARA A COORDENADA Y.....	91
QUADRO 4.17 - CÁLCULO ESTATÍSTICO PARA A COORDENADA Z.....	91
QUADRO 4.18 - CLASSIFICAÇÃO DO PRODUTO CARTOGRÁFICO QUANTO ÀS CLASSES E ESCALAS.	92
QUADRO 4.19 - CLASSIFICAÇÃO DO PRODUTO CARTOGRÁFICO QUANTO ÀS CLASSES E ESCALAS – 7 PONTOS DE APOIO.....	93
QUADRO 4.20 - CLASSIFICAÇÃO DO PRODUTO CARTOGRÁFICO QUANTO ÀS CLASSES E ESCALAS – 20 PONTOS DE APOIO.....	94

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	17
1.1	OBJETIVOS	18
1.1.1	Objetivo Geral	18
1.1.2	Objetivos Específicos	18
1.2	JUSTIFICATIVA	19
2.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	20
2.1	VEÍCULOS AÉREOS NÃO TRIPULADOS.....	20
2.1.1	Definição, equipamentos embarcados, regulamentação e classificação	20
2.1.2	Vantagens e desvantagens da utilização dos SISVANT	23
2.2	FOTOGRAMETRIA A PARTIR DE UM VANT	24
2.2.1	Geometria das fotografias aéreas	25
2.2.2	Parâmetros de orientação das câmeras	28
2.2.3	Fototriangulação	31
2.2.4	Modelos digitais	33
2.2.5	Ortofoto digital	37
2.3	CONTROLE DE QUALIDADE DE PRODUTOS CARTOGRÁFICOS	39
2.3.1	Padrão de exatidão cartográfica	40
3.	MATERIAIS E MÉTODOS	43
3.1	ÁREA DE ESTUDO.....	43
3.2	MATERIAIS.....	46
3.3	MÉTODOS	46
3.3.1	Estudo preliminar da área a ser imageada	47
3.3.2	Plano de voo	48
3.3.3	Pré-sinalização dos pontos de controle	52
3.3.4	Execução do rastreamento dos pontos de controle do terreno (GCP)	54
3.3.5	Aquisição dos dados e imagens através do SISVANT	56
3.3.6	Processamento das imagens	59
3.3.7	Métodos empregados na avaliação da exatidão posicional	70
3.3.8	Análise estatística no controle de qualidade das ortofotos	71
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	74
4.1	PROCESSAMENTO DOS DADOS ATRAVÉS DO AGISOFT PHOTOSCAN.....	74
4.1.1	Parâmetros de Orientação Exterior	74
4.1.2	Alinhamento das fotografias aéreas.....	75

4.1.3	Aerotriangulação e obtenção do Modelo Digital de Elevação	76
4.1.4	Geração das ortofotos.....	82
4.2	CONTROLE DE QUALIDADE DOS PRODUTOS OBTIDOS.....	83
4.2.1	Comparações entre as configurações.....	83
4.2.2	Análise de Tendência.....	88
4.2.3	Análise de Exatidão	90
5.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	94
	REFERÊNCIAS	98
	ANEXO I - DECRETO Nº 89.817 DE 20 DE JUNHO DE 1984	105
	ANEXO II - TABELA T-STUDENT	116
	ANEXO III - DISTRIBUIÇÃO QUI-QUADRADO	117
	ANEXO IV - ORTOFOTOCARTA DA ÁREA DE ESTUDO.....	118

1. INTRODUÇÃO

O avanço tecnológico obtido nas últimas décadas proporcionou maior acesso à geoinformação, sobretudo na aquisição de dados espaciais e na redução dos custos de produção e manutenção de produtos cartográficos. A evolução das técnicas de coleta da informação espacial envolveu diversos setores da sociedade e possibilitou ampliar a produção científica nacional.

O embarque de sensores em Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT's) para a aquisição de informação espacial, com vistas à elaboração de produtos cartográficos, fotointerpretação e atualização de bases cadastrais, teve um grande avanço a partir do século XXI, através de modernas etapas de processamento digital entre as fotografias aéreas adquiridas com câmeras digitais. Neste contexto, os VANT's começavam a ganhar destaque na comunidade científica pela versatilidade e praticidade na execução de voos e, conseqüente, obtenção de dados.

Em vista disso, o embarque de câmeras digitais para a captação de fotografias aéreas se tornou o principal enfoque do viés em se utilizar um VANT para se efetuar um aerolevantamento, uma vez que as missões se tornavam menos onerosas, comparando-as com empresas de aerolevantamento convencional, nas quais estavam inseridos os altos custos da utilização de câmeras aerofotogramétricas métricas.

Dessa forma, pela facilidade de utilização de um VANT, tanto na tomada das fotografias ou no processamento digital para a obtenção de modelos digitais e ortofotos, vários profissionais de distintas áreas têm aproveitado essa ferramenta para a produção de produtos cartográficos de interesse, através do imageamento da área de estudo com objetivo de obter a topografia do terreno juntamente com a identificação de feições, visando à atualização temporal de bases cartográficas. Porém, qual é a viabilidade operacional no desenvolvimento destes produtos? Qual a confiabilidade da informação extraída?

Diante do exposto, o objetivo deste trabalho consistiu em propor uma metodologia capaz de gerar ortofotos, de forma semi-automática, a partir de dados brutos oriundos de um VANT, bem como avaliar sua exatidão absoluta, através de configurações distintas na utilização de pontos de apoio.

A representação gráfica resultante da captação das imagens aéreas e do processamento dos dados possui uma estrutura de dados gráficos que contribui sobremaneira na atualização de bases cartográficas, no que tange as modificações

decorrentes do processo natural do uso do solo, e que poderão vir a compor um Sistema de Informação ou servir de fonte de informação a diversas organizações de planejamento territorial.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar a aplicabilidade da tecnologia VANT à atualização de bases cartográficas.

1.1.2 Objetivos Específicos

- a) Executar o levantamento aéreo através de um VANT, embarcado com uma câmera digital convencional (não métrica);
- b) Processar os dados obtidos através de software específico;
- c) Gerar ortofotos digitais empregando os dados brutos advindos do sistema de posicionamento GNSS do centro de perspectiva da câmera e apoio de campo, em distintas configurações;
- d) Identificar se os produtos cartográficos representam de maneira fidedigna as feições naturais da área de estudo;
- e) Avaliar a qualidade da metodologia desenvolvida por meios comparativos de exatidão absoluta, através da análise estatística das discrepâncias;

1.2 JUSTIFICATIVA

Sabe-se que a ocupação do solo e o uso do território se compõem de maneira dinâmica, o que de pronto modo torna os produtos cartográficos desatualizados. Esta desatualização tem sido solucionada ou atenuada através de levantamentos topográficos tradicionais, utilizando-se estações totais e GNSS de alta precisão, no caso de pequenas áreas, ou por meio de levantamentos aerofotogramétricos clássicos, no caso de grandes áreas. Entretanto, para áreas com tamanhos intermediários como se deve proceder esta atualização, visto que os métodos tradicionais tornam o levantamento moroso, por outro lado, os métodos clássicos são, na maioria das vezes, onerosos?

Neste contexto, a utilização de VANT's de pequeno porte, embarcados com câmera digital convencional (não métrica), constitui uma oportunidade crível para desempenhar esta tarefa. As principais vantagens dos VANT's comparados aos meios aéreos clássicos são: redução nos custos de operação, maior rapidez nas missões, possibilidade de atuação em diversas altitudes, inclusive abaixo das nuvens e grande facilidade de manuseamento (SERRA, 2014).

Considerando a temática referente à geoinformação, o acesso a bases de dados georreferenciadas associadas às imagens de satélite se faz presente no dia a dia das pessoas, seja pela miniaturização e diversificação dos aparelhos portáteis com conexão a dados, seja pela busca incessante por informação e comunicação em tempo real. Essa propagação acarretou uma imensa demanda por mais dados, com maior qualidade, atualizações frequentes e resoluções cada vez maiores (FERREIRA, 2014).

Neste âmbito, a obtenção de dados via VANT e a consequente geração de produtos cartográficos digitais tem sido alvo de estudos de muitos pesquisadores, principalmente no que se refere a qualidade dos produtos obtidos, bem como sua potencial utilização de acordo com a escala desejada (MITSHITA *et al.*, 2014, FERREIRA *et al.*, 2013; BARRY; COAKLEY, 2013; ROBERTO, 2013; ALVES JUNIOR *et al.*, 2011). Santos e Segantine (2006) relataram, ainda, que a ausência de dados precisos implica no fornecimento de informações não confiáveis, gerando erros comprometedores à qualidade dos estudos e de modo a promover desperdícios de verbas destinadas à solução de problemas.

Sendo assim, a principal motivação desta pesquisa é a de fornecer uma alternativa para a atualização de bases cartográficas a partir de ortofotos digitais de áreas

de interesse com tamanho intermediário a baixo custo e com vistas ao mapeamento temático e a complementação de dados para tomada de decisões técnicas.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 VEÍCULOS AÉREOS NÃO TRIPULADOS

2.1.1 Definição, equipamentos embarcados, regulamentação e classificação

Os VANT's foram, inicialmente, desenvolvidos em larga escala durante a 2ª Guerra Mundial, para fins militares pela indústria Reginald Denny. Essa indústria fabricou também aeronaves rádio controladas para diversão e passatempo (AGOSTINHO; OLIVEIRA FILHO, 2011).

Nos anos 50, no Canadá e Estados Unidos, os VANT's foram muito utilizados para identificar, posicionar e quantificar as espécies arbóreas de interesse para a indústria madeireira dentro de uma floresta (CÔRTEZ, 1998).

Porém, ressurgiram no início do século XXI, através do desenvolvimento dos sistemas de navegação por satélite, da miniaturização dos sistemas inerciais, das câmaras digitais leves e compactas, bem como dos programas computacionais capazes de gerar produtos em processos semi-automáticos (ALVES JÚNIOR *et al.*, 2013).

A melhor definição para os VANT's vem sendo atualizada constantemente em paralelo com sua regulamentação perante os órgãos oficiais reguladores. A Portaria Normativa nº 606 do Ministério da Defesa, de 11 de junho de 2004, caracteriza-o, através de seu Artigo 4º, como:

"Uma plataforma aérea de baixo custo operacional que pode ser operada por controle remoto ou executar perfis de voo de forma autônoma podendo ser utilizada para:

- a) transportar cargas úteis convencionais, como sensores diversos e equipamentos de comunicação;
- b) servir como alvo aéreo; e
- c) levar designador de alvo e cargas letais, sendo nesse caso empregado com fins bélicos."

De acordo, também, com a Instrução Suplementar (IS) Nº 21/2012 – Revisão A (ANAC, 2012), o SISVANT é composto por uma aeronave, projetada para operar sem

piloto a bordo e que não seja utilizada para fins meramente recreativos, e pelos seus componentes associados, tornando-se, dessa forma, um Sistema de Veículo Aéreo Não Tripulado. Nesta definição, incluem-se todos os aviões, helicópteros e dirigíveis controláveis nos três eixos, excluindo-se, portanto, os balões tradicionais e os aeromodelos.

De uma maneira simplificada, Oliveira (2005) conceitua-o, também, como uma plataforma de baixo custo operacional, operado por intermédio de um controle remoto em terra ou que segue um plano de voo pré-estipulado antes de seu lançamento, capaz de executar diversas tarefas, tais como monitoramento, reconhecimento tático, vigilância, mapeamento, ataque e outras, dependendo dos equipamentos instalados.

A principal característica do SISVANT é a possibilidade de embarcar sensores (câmera fotográfica digital) e equipamentos (receptores GNSS - *Global Navigation Satellite System*), e, com isso, extrair as informações espaciais de interesse. Neste contexto, o avanço tecnológico possibilitou a miniaturização dos sensores e alavancou a construção de aeronaves não tripuladas compactas e leves, facilmente transportadas aos locais que se deseja imagear. Em paralelo, o desenvolvimento de softwares, especialmente os de planejamento e controle de voo, favoreceu a operação dos VANT's e de seus sensores, programando previamente as áreas de interesse para o mapeamento.

Apesar de estarem equipados com receptores de sinais GNSS, os VANT's não são capazes de realizarem um voo em trajetória perfeitamente retilínea ou mesmo manter a altitude de voo em tempo integral, devido, principalmente, ao impacto que o vento exerce sob sua leve carenagem. As fotografias tomadas pelo VANT apresentam, também, problemas de escala e recobrimento lateral e longitudinal devido à instabilidade de sua atitude (κ , ω e ϕ). Essa instabilidade pode gerar região sem cobertura fotográfica ou com recobrimento insuficiente para extrair as informações necessárias (ALVES JÚNIOR *et al.*, 2013). Sendo necessário, portanto, diminuir o intervalo entre a tomada das fotos ou aumentar o número de faixas de voo.

A obtenção de fotografias e imagens aéreas através de voo fotogramétrico convencional se tornam onerosas, quando a análise temática compreende uma pequena área isolada (CUNHA *et al.*, 2009). Mesmo pensamento é defendido por Favarin *et al.* (2013) ao afirmarem que as plataformas de obtenção das fotografias aéreas evoluíram desde as primeiras fotos obtidas e os VANT's se apresentaram como uma tecnologia capaz de proporcionar mapeamentos de áreas com o uso de fotografias aéreas de pequeno formato a um custo inferior aos levantamentos fotogramétricos convencionais.

Se corretamente obtidas, essas fotos terão qualidade suficiente para permitir uma fotointerpretação adequada, de onde se podem extrair as informações de interesse. De maneira análoga, Agostinho e Oliveira Filho (2011) afirmaram que a utilização de métodos tradicionais para a obtenção de fotografias aéreas em situações em que se deseja obter informações de pequenas áreas pode não ser economicamente viável se comparado ao uso de VANT's, pois, dependendo da finalidade do estudo, as imagens provenientes de câmeras fotográficas comuns podem render ótimos resultados, dispensando toda a aparelhagem apropriada e específica dos aerolevantamentos convencionais, e consequentemente barateando todo o processo.

Apesar de serem objetos de vasto estudo nas últimas três décadas, ainda não há um consenso estabelecido que regule e classifique os VANT's. Segundo Silva (2013), na falta de normas internacionalmente aceitas, cada país ou conjunto de países estão desenvolvendo suas próprias regras para agrupar os VANT's em diversas categorias, o que resulta em inúmeros tipos de classificações. Na Europa, em geral, e em alguns países específicos, como na Inglaterra e na França, já existem definições bem claras quanto a classificação. No Brasil, a ANAC (2012), em sua Instrução Suplementar (IS) Nº 21/2012 – Revisão A, item 5.1.3.6 e 5.1.3.7, considerou como VANT os protótipos que operem a mais de 400 ft (121,92 metros) acima da superfície terrestre (*Above Ground Level – AGL*) ou além da linha de visada visual, ainda que abaixo desta altura. Também, deve-se considerar o seu peso máximo de decolagem superior a 25 kg, ainda que operando em linha de visada visual e abaixo de 400 ft AGL.

Em geral, as classificações já aceitas levam em consideração o peso máximo de decolagem, a autonomia operacional, a distância e a altura máxima de voo, além da energia de impacto no solo.

Com relação à regulamentação dos voos, nenhum VANT civil pode operar em território nacional sem autorização da ANAC, do Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA), Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL) e de outros órgãos reguladores, por exemplo, do Ministério da Defesa ou Comando da Aeronáutica.

Atualmente, existem três documentos oficiais que relatam sobre a regulamentação dos VANT's no Brasil, sendo eles:

1. Circular de Informações Aeronáuticas - AIC nº 21/10 - DECEA, Setembro/2010: publicação que tem por finalidade apresentar as informações necessárias para o uso de veículos aéreos não tripulados no espaço aéreo brasileiro;

2. Decisão nº 127 – ANAC, Novembro/2011: autorização para operação aérea de Aeronave Remotamente Pilotada do Departamento de Polícia Federal; e
3. Instrução Suplementar nº 21-002 - Revisão A - ANAC, Outubro/2012: Orienta aplicação da seção 21.191 do RBAC 21 (Regulamento Brasileiro de Aviação Civil) para emissão de CAVE (Certificado de Autorização para Voo Experimental) para SISVANT de uso experimental (pesquisa e desenvolvimento, treinamento de tripulações e pesquisa de mercado).

Portanto, pode-se afirmar que as futuras operações com SISVANT no Brasil, serão regulamentadas somente com a posse dos seguintes documentos:

- a) Autorização da ANATEL, para exploração do serviço de telecomunicações e de uso de radiofrequências;
- b) Autorização da ANAC, para obtenção de um Certificado de Autorização de Voo Experimental (CAVE), no caso de solicitação para operação experimental ou solicitação para Autorização Especial de Voo, no caso de operações com fins lucrativos; e
- c) Autorização do DECEA para uso do espaço aéreo. Independentemente da posse de um Certificado de Autorização da ANAC, toda operação com VANT's será condicionada à autorização do DECEA, da ANATEL e, em alguns casos, do Ministério da Defesa ou do Comando da Aeronáutica (vide §4º e §5º do Art. 8º da Lei 11.182, de 27 de setembro de 2005) (ANAC, 2012).

2.1.2 Vantagens e desvantagens da utilização dos SISVANT

Os VANT's apresentam como característica principal o fator “baixo custo”, seja pela redução dos custos operacionais ou de aquisição da própria plataforma. Atualmente, tem-se utilizado para aerolevantamentos em pequenas áreas, sendo uma alternativa ideal, conciliando o baixo custo com a rapidez na execução da operação. A rapidez de execução permite avaliar em tempo real a qualidade dos dados obtidos, permitindo refazer o procedimento a fim de corrigir ou melhorar os resultados.

Com relação às imagens aéreas, há uma grande flexibilidade na forma de processamento das mesmas, sendo possível se obter ortofotos digitais de forma

automática ou semiautomática, devido, principalmente, aos consideráveis avanços no desenvolvimento de potentes hardwares e softwares.

Quanto às desvantagens, ainda há limitações que implicam na qualidade do produto final oriundo do aerolevantamento com VANT's, sendo algumas delas: o peso da câmera fotográfica e seu embarque na plataforma; a grande distorção geométrica, causada pela instabilidade posicional do VANT ao executar o imageamento; e a grande quantidade de dados para o processamento, necessitando de hardwares cada vez mais potentes, acarretando em aumento do investimento inicial.

2.2 FOTOGRAMETRIA A PARTIR DE UM VANT

Etimologicamente, a palavra “fotogrametria” vem a ser “photon (luz), graphos (escrita), metron (medições)”, ou medições executadas através de fotografias. Entretanto, o consenso geral define tal termo como a ciência e tecnologia de se obter informação confiável, através de imagens adquiridas por sensores, com o objetivo de reconstruir um espaço tridimensional, chamado de espaço objeto, a partir de imagens bidimensionais, chamadas de espaço imagem, advindas da gravação de padrões de ondas eletromagnéticas, sem contato físico direto com o objeto ou alvo de interesse (BRITO; COELHO, 2002).

De acordo com Brito e Coelho (2002), a fotogrametria digital surgiu na década de 80, através de imagens digitais adquiridas diretamente de uma câmera fotográfica digital, ou mesmo através da digitalização matricial de uma imagem analógica. Entretanto, somente nos anos 90, que foi utilizada de maneira extensiva, devido ao desenvolvimento de computadores com grande capacidade de armazenamento e processamento de dados, visando à reconstrução automática do espaço tridimensional. Entretanto, atualmente o que se consegue efetivamente é um mapeamento semiautomático, ou seja, os processos implementados tentam ser automáticos, porém, ainda exigem a supervisão e eventual intervenção humana nos mesmos.

A aerofotogrametria é uma técnica que tem como objetivo elaborar mapas mediante fotografias aéreas tomadas com câmeras aerotransportadas, e é comumente classificada em vertical e oblíqua.

Os conceitos introduzidos a seguir foram abordados sob o enfoque do embarque de uma câmera digital convencional (não métrica) em um VANT, visando para a obtenção de fotografias aéreas de pequeno formato.

2.2.1 Geometria das fotografias aéreas

As fotografias aéreas verticais são tomadas com o eixo da câmara direcionadas o mais verticalmente possível. Se o eixo da câmara estiver perfeitamente na vertical quando uma exposição for tomada, o plano fotográfico será paralelo ao plano de referência e a fotografia resultante seria denominada vertical verdadeira. Na prática, o eixo da câmara raramente encontra-se perfeitamente na vertical, devido a inevitável inclinação da aeronave. Quando o eixo da câmara encontra-se involuntariamente e ligeiramente inclinado na vertical, a fotografia resultante é chamada de fotografia inclinada. Estas inclinações involuntárias são, normalmente, menos do que um grau e raramente mais de três graus. Para muitas aplicações práticas, os procedimentos adequados para a análise de imagens realmente verticais podem também ser usados para fotos inclinadas sem consequências graves. As fotografias aéreas oblíquas são expostas com o eixo da câmara intencionalmente inclinada para longe de vertical. Uma fotografia oblíqua alta inclui o horizonte; uma oblíqua baixa não (WOLF, 2004).

Uma fotografia aérea convencional é aquela obtida por câmaras fotográficas métricas, acopladas em aeronaves comuns. As fotografias aéreas obtidas via VANT são adquiridas por câmaras fotográficas digitais convencionais (não métricas). Na maioria das vezes, o sistema de lentes e as próprias câmaras digitais não são elaborados para apresentar a alta qualidade e exatidão das câmaras métricas. Quando isso ocorre, as câmaras são chamadas de “não métricas”. O recobrimento aéreo é dito aerofotogramétrico quando utiliza câmaras métricas, e aerofotográfico quando utiliza câmaras não métricas, respectivamente.

Para Santos (2013), as câmaras não métricas possuem algumas vantagens em relação às métricas, tais como: menor peso e facilidade de manejo; custo reduzido; possuem intervalos de distâncias focais; flexibilidade de integração com sistemas GNSS e inercial; podem ser integradas em diversos tipos de aeronaves; grande disponibilidade no mercado; facilidade na repetição de voos constantes, possibilitando atualização sempre

que necessário; maior riqueza de detalhes, devido a altitude mais baixa; diminuição substancial dos custos de aquisição; entre outras.

De maneira análoga, podem-se elencar algumas desvantagens em se utilizar as fotografias aéreas obtidas através de um SISVANT, tais como: a variação de controle sobre as fotografias, causada pela pouca precisão no conhecimento da posição e orientação da plataforma no momento da tomada de cada uma das fotografias; a não verticalidade do eixo óptico da câmera; a instabilidade da plataforma aérea sob condições ambientais adversas (vento); e a necessidade de correta focalização do objeto (ajustamento da lente para o infinito), a fim de se evitar os deslocamentos da lente, resultando em fotografias fora de foco. Silva *et al.* (2005) também citam algumas desvantagens bem reconhecidas das câmeras não métricas, a saber:

- a) Necessidade de maior quantidade de imagens para cobrir a mesma área;
- b) Distorções geométricas significativas;
- c) Dificuldade de conseguir a superposição corretamente pré-estabelecida;
- d) Dificuldade de manutenção de rota e estabilidade durante o voo devido a maiores turbulências em voos em baixa altitude;

Segundo Martins (2010), as câmeras fotográficas digitais convencionais possuem os dispositivos proporcionalmente pequenos em relação às métricas, como exemplo: o tamanho das lentes, a distância focal, o tamanho do filme (ou, atualmente, tamanho do sensor), e o tamanho do corpo da câmera. Para Machado (2006), as câmeras não métricas apresentam custos decrescentes com resoluções crescentes, sendo sua resolução incontestável mesmo nos modelos mais simples.

A Figura 2.1 ilustra alguns exemplos de câmeras fotográficas digitais convencionais (não métricas).



FIGURA 2.1 - MODELOS DE CÂMERAS DIGITAIS DE PEQUENO FORMATO.

FONTE:

Disponível em: http://www.dxomark.com/var/ezwebin_site/storage/images/media/images/dxomark-compare-sony-nex-c3-vs-nikon-d7000-vs-sony-alpha-a580/25643-1-eng-US/dxomark-compare-sony-nex-c3-vs-nikon-d7000-vs-sony-alpha-a580.jpg.

Na fotografia vertical, pode-se estabelecer uma relação geométrica, ilustrada pela Figura 2.2, entre a fotografia e a cena fotografada.

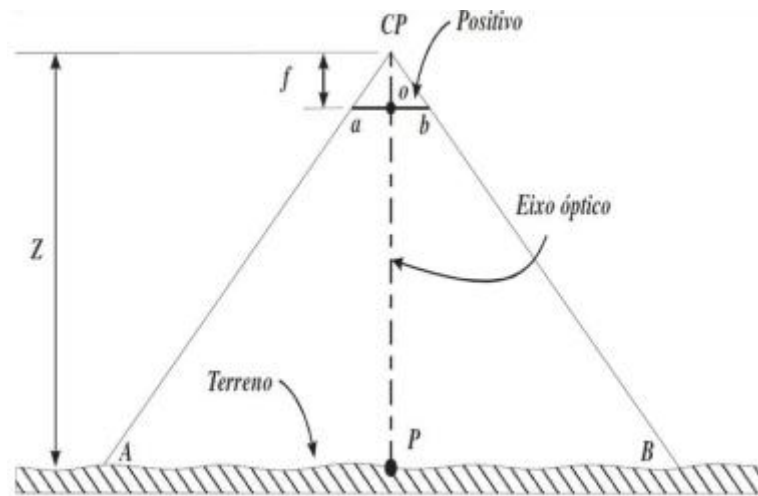


FIGURA 2.2 - RELAÇÃO GEOMÉTRICA DA FOTOGRAFIA VERTICAL.
FONTE: Reiss (2008).

A equação (2.1) correlaciona os parâmetros apresentados na fotografia vertical:

$$\frac{f}{Z} = \frac{ab}{AB} \quad (2.1)$$

Onde:

- f = Distância focal;
- AB = Distância conhecida do terreno;
- ab = Distância medida na imagem;
- Z = Distância câmera-objeto (altura de voo).

No exemplo supracitado considera-se que a superfície do terreno é plana. Quando esta é irregular (Figura 2.3), utiliza-se a equação (2.2), a seguir:

$$\frac{f}{H-h_{AB}} = \frac{ab}{AB} \quad (2.2)$$

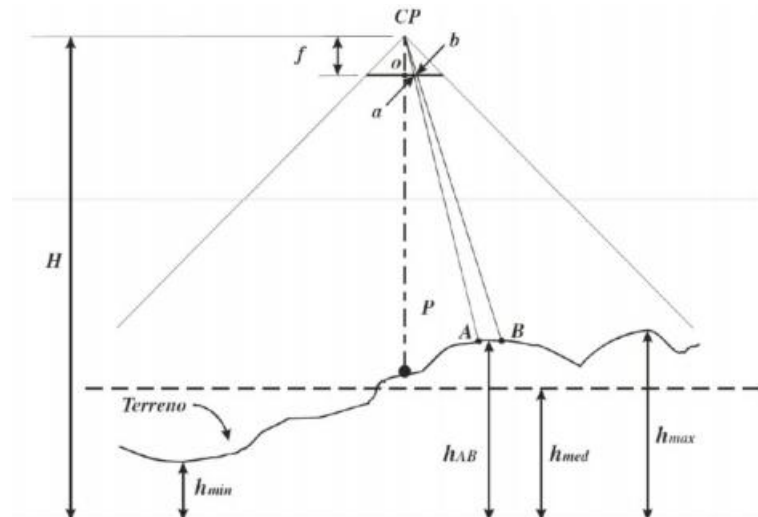


FIGURA 2.3 - RELAÇÃO GEOMÉTRICA EM TERRENO IRREGULAR.
FONTE: Reiss (2008).

Sendo:

- H = Altitude da câmera no momento da tomada da fotografia; e
- h_{AB} = Média da altitude dos pontos A e B.

2.2.2 Parâmetros de orientação das câmeras

2.2.2.1 Orientação interior

Por orientação interior entende-se a reconstrução do feixe perspectivo, ou seja, o referenciamento da imagem em relação à câmera. Uma vez que as imagens obtidas encontram-se isoladas uma das outras e meramente salvas como arquivos digitais, sem nenhuma informação métrica, isto é, utilizando apenas o sistema de coordenadas em pixels, próprio das imagens digitais; faz-se necessário reconstituir o sistema interno câmera-imagem correspondente ao momento em que as fotografias foram obtidas. Somente assim, poderão ser efetuadas medidas com precisão sobre as imagens fotográficas. Conceitualmente, a orientação interior consiste apenas em colocar as imagens por imagem em posição semelhante à que exerciam dentro da câmera, no momento em que foram obtidas (BRITO; COELHO, 2002).

Os parâmetros de orientação interior são aqueles inerentes ao sistema ótico e do sensor da câmara, normalmente são: a distância focal do conjunto de lentes, os parâmetros de distorção radial, os parâmetros de distorção descentrada e a posição da

coordenada central no sistema de coordenadas da câmera. Estes parâmetros são obtidos durante o processo de calibração da câmara, utilizados para a correção de distorções nas imagens (FERREIRA, 2014).

2.2.2.2 Orientação exterior

O objetivo fundamental da orientação exterior (ou externa) é a obtenção da posição e atitude de cada foto em relação ao referencial do espaço objeto. Pode-se dizer, então, que uma imagem está orientada exteriormente se são conhecidos os seis parâmetros de orientação exterior para a mesma, a saber: coordenadas no espaço-objeto para o centro de perspectiva e ângulos de rotação ou de atitude do sensor (k, φ, ω).

Há seis parâmetros de orientação exterior (POE) que localizam a imagem no espaço, a saber: X_{cp}, Y_{cp}, Z_{cp} , que representam as posições do centro de perspectiva nos eixos X, Y e Z, respectivamente, do sistema de coordenadas do espaço objeto, e os ângulos de Euler (k, φ, ω), que representam rotações sofridas pelo sistema local de coordenadas x, y, z de cada câmera em relação ao sistema global do terreno X, Y, Z.

Os ângulos (ω, φ) representam a rotação do eixo x e y em relação a X e Y, respectivamente. São contados no sentido anti-horário e devem ser pequenos, não ultrapassando cinco graus em valor absoluto, no caso de fotografias perfeitamente verticais. O ângulo (k) representa a rotação do eixo z em relação a Z e seu sentido é, também, anti-horário (BRITO; COELHO, 2002).

A orientação exterior pode ser determinada indiretamente por meio de um conjunto de fotos (bloco ou modelo) ou pelo processo de resseção espacial, onde cada foto é considerada isoladamente. A orientação exterior utiliza o modelo matemático de colinearidade, que relaciona o ponto medido na imagem com o ponto que se encontra no espaço-objeto (REISS, 2007).

A relação entre o espaço-imagem e o espaço-objeto é feita através das equações de colinearidade. O centro perspectivo da câmera (O), um ponto no sistema fotogramétrico (p) e esse ponto no espaço-imagem são ditos colineares, ou seja, há uma reta comum que liga esses três pontos (PALERMO; LEITE, 2013), conforme a Figura 2.4.

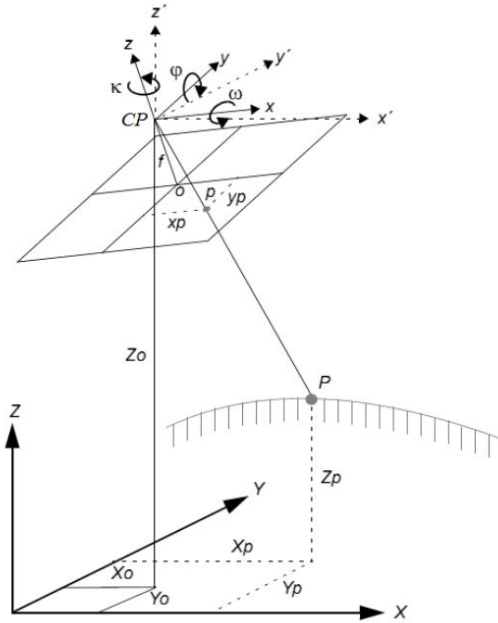


FIGURA 2.4 - CONDIÇÃO DE COLINEARIDADE E ELEMENTOS DE ORIENTAÇÃO EXTERIOR.
 FONTE: Palermo; Leite (2013).

A Equação da Colinearidade expressa que, independentemente da posição que a câmera tenha assumido no espaço (atitude: k, φ, ω), na hora da exposição, o feixe luminoso descreve uma reta entre o ponto do terreno (X, Y, Z) e a posição espacial do centro ótico da câmera (X_{cp}, Y_{cp}, Z_{cp}) naquela estação de tomada fotográfica. Os coeficientes m_{11} até m_{33} expressam a atitude da câmera (ângulos). Cada ponto dessa fotografia pode ser representado por um par de equações (2.3 e 2.4), sendo:

$$x = -f \cdot \frac{m_{11}(X - X_{cp}) + m_{12}(Y - Y_{cp}) + m_{13}(Z - Z_{cp})}{m_{31}(X - X_{cp}) + m_{32}(Y - Y_{cp}) + m_{33}(Z - Z_{cp})} \quad (2.3)$$

$$y = -f \cdot \frac{m_{11}(X - X_{cp}) + m_{12}(Y - Y_{cp}) + m_{13}(Z - Z_{cp})}{m_{31}(X - X_{cp}) + m_{32}(Y - Y_{cp}) + m_{33}(Z - Z_{cp})} \quad (2.4)$$

2.2.3 Fototriangulação

Mitishita (1986) afirma que a aerotriangulação é considerada o método de maior aplicabilidade na extensão do controle e orientação absoluta dos modelos fotogramétricos na restituição estereofotogramétrica.

Segundo Lugnani (1987), a fototriangulação é um método fotogramétrico no qual são determinadas as coordenadas dos pontos no espaço-objeto através da relação geométrica de fotos adjacentes devidamente tomadas, de um esparso controle de campo dado e de valores aproximados de parâmetros.

Andrade (1998) conceitua fototriangulação como uma técnica fotogramétrica para a determinação de coordenadas de pontos num referencial específico, que tem como objetivo maior o fornecimento de coordenadas precisas para os pontos necessários para a orientação absoluta de modelos fotogramétricos para restituição ou para a elaboração de ortofotos.

A resseção espacial é o processo pelo qual se obtém as coordenadas do centro de perspectiva e os ângulos de atitude do sensor no instante da aquisição da imagem, a partir de três pontos de controle (supondo-se que os elementos da orientação interior sejam conhecidos). A interseção espacial possibilita a obtenção das coordenadas tridimensionais de um ponto qualquer no espaço objeto (terreno), a partir de suas coordenadas bidimensionais obtidas no espaço imagem (SILVEIRA; BRITO, 2004). Essas operações são realizadas conjuntamente na etapa de fototriangulação pela qual as orientações das fotografias e as coordenadas dos pontos são determinadas ao mesmo tempo, embora a resseção seja raramente, sendo mais utilizada para gerar aproximações iniciais necessárias às etapas de ajustamento (MIKHAIL *et al.*, 2001).

Para o caso de levantamento fotogramétrico aéreo, a fototriangulação também é denominada aerotriangulação. Para que seja possível realizar a fototriangulação, são necessárias medições de pontos comuns nas fotografias, chamados pontos de ligação (PALERMO; LEITE, 2013).

Esta operação pode ser realizada pelo método dos modelos independentes ou pelo método de ajustamento por feixes perspectivos. O método dos feixes perspectivos permite que a fototriangulação seja executada para todas as imagens que compõem o espaço-imagem e para todos os pontos fotogramétricos contidos nestas imagens em um único processo, reconstruindo a geometria dos feixes de raios luminosos formadores do espaço-imagem no momento da aquisição das imagens fotográficas. O processo se vale

do Método dos Mínimos Quadrados (MMQ) para minimizar a função que quantifica o desvio-padrão do ajustamento, de forma que cada raio ajustado, originando-se em uma posição qualquer do espaço objeto, passe o mais próximo possível do seu homólogo no espaço imagem e do centro de perspectiva da imagem (SILVEIRA; BRITO, 2004).

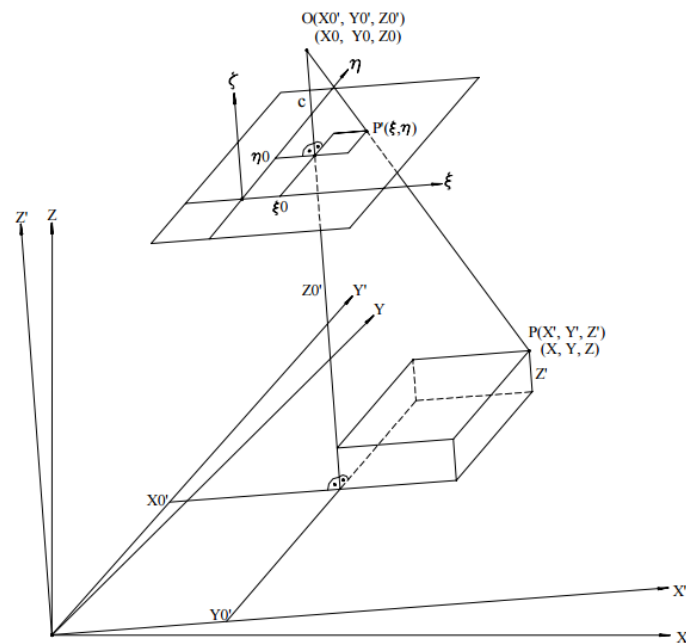
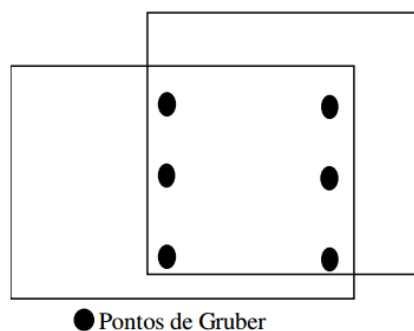


FIGURA 2.5 - CONDIÇÃO DE COLINEARIDADE ENTRE OS PONTOS NOS ESPAÇO-IMAGEM E OBJETO.

FONTE: Silveira; Brito (2004).

É prática comum e recomendada para melhorar a geometria de faixas e blocos de fotografias a medição de pontos nas regiões de Gruber, localizadas de acordo com a Figura 2.6. Estes pontos podem ser medidos manualmente ou de forma automática, utilizando operações matemáticas de correlação de imagens. Através da correlação de imagens são definidas regiões comuns em diferentes fotografias de uma mesma cena, buscando-se identificar o pixel correspondente de uma imagem em outra (PALERMO; LEITE, 2013).



● Pontos de Gruber

FIGURA 2.6 - LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS DE GRUBER.
FONTE: Santos (2010).

Ainda segundo Palermo e Leite (2013), além da medição de pontos de ligação, a medição de pontos de apoio constitui outro fator fundamental para se garantir a robustez geométrica de faixas e blocos de fotografias. Suas coordenadas planialtimétricas são conhecidas através de levantamentos de campo, e devem ser medidos nas fotografias, de modo a orientar os produtos gerados a um referencial comum ao desses pontos de apoio.

2.2.4 Modelos digitais

A obtenção de modelos que reproduzem sobre um plano, graficamente, a sensação do relevo terrestre, leva em consideração os recursos computacionais atualmente disponíveis. Os modelos em perspectiva são conhecidos como Modelos Digitais do Terreno (MDT ou *Digital Terrain Model - DTM*), ou Modelos Digitais da Superfície (MDS ou *Digital Ground Model - DGM*). O termo Modelo Digital do Terreno é o mais utilizado (ASPIAZÚ *et al.*, 1990).

A característica do terreno, geralmente referenciada, é o relevo estimado pela sua cota ou altitude. Portanto, a expressão Modelo Digital de Elevação (MDE ou *Digital Elevation Model - DEM*), refere-se aos modelos que consideram, como característica do terreno, somente a elevação. MIKHAIL *et al.* (1978) consideraram os modelos de elevação como subconjuntos dos modelos digitais do terreno.

Para a representação de uma superfície real no computador, é indispensável a elaboração e criação de um modelo digital, que pode estar representado por equações analíticas ou uma rede (grade) de pontos, de modo a transmitir ao usuário as características espaciais do terreno (ZANARDI, 2006). Dessa forma, no processo de elaboração de MDT podem-se elencar três distintas fases, a saber:

- a) Obtenção dos dados;
- b) Geração de grades;
- c) Elaboração de produtos representando as informações obtidas.

2.2.4.1 Obtenção de dados

Considerada uma das etapas mais importantes do processo, a amostragem compreende a aquisição de um conjunto de amostras que representam a variação de um fenômeno espacial de interesse. Uma amostragem não pode ser insuficiente, (subamostragem), nem tampouco ser redundante (superamostragem). A subamostragem, por falta de informação, leva a geração de um modelo pobre. A superamostragem, por excesso de informação, sobrecarrega o sistema com o uso excessivo de memória e pode, como será visto adiante, prejudicar os resultados de uma modelagem. Nenhuma modelagem, por mais complexa ou sofisticada que seja, pode compensar os efeitos de uma amostragem mal feita. A amostragem não é, em geral, aleatória. A amostragem deve ser representativa do comportamento do fenômeno que se está modelando. Uma superamostragem nem sempre significa uma amostragem representativa. Na definição de uma amostragem representativa deve-se considerar a quantidade e também o posicionamento das amostras em relação ao comportamento do fenômeno a ser modelado. Por exemplo, uma superamostragem de altimetria numa região plana significa redundância de informação enquanto que poucos pontos em uma região de relevo movimentado significa escassez de informações (FELGUEIRAS, 2001).

Felgueiras (2001) relata ainda que o cuidado na escolha dos pontos e a quantidade de dados amostrados estão diretamente relacionados com a qualidade do produto final de uma aplicação sobre o modelo. Para aplicações onde se requer um grau de realismo maior, a quantidade de pontos amostrados, bem como o cuidado na escolha desses pontos, ou seja, a qualidade dos dados, é decisiva. Quanto maior a quantidade de pontos representantes da superfície real, maior será o esforço computacional para que estes sejam armazenados, recuperados, processados, até que se alcance o produto final da aplicação.

Para Rocha (2000), no processo de amostragem devem ser levantados os pontos representativos da topografia ou da superfície de interesse, procurando cobrir toda a área amostrada na densidade necessária às particularidades locais. Neste processo, devemos considerar, principalmente, os pontos característicos do terreno tais como: pontos notáveis (altos, baixos ou mudança de declive), linhas de estrutura (linhas naturais do terreno: cristas, vales, talwegues e rios), *breaklines* (linhas construídas: estradas, muros) e áreas planas (áreas existentes ou construídas que possuem a mesma cota, como platôs, campos de futebol, lagos e outras).

Dessa forma, conforme explica Medina e Medina (2007), os modelos digitais de terreno são elaborados a partir de modelos gerados no formato de grade regular ou irregular, simplificando a implementação dos algoritmos de aplicação e os tornam mais rápidos computacionalmente.

2.2.4.2 Geração de grades

O processo de geração de um modelo de grade compreende a construção de uma malha, regular ou irregular, e a definição de funções interpolantes locais. Essas funções são definidas para cada elemento da malha. Assim para cada elemento básico da grade, retângulo ou triângulo, define-se uma função interpolante que é válida para os pontos internos ao elemento. Esse processo é conhecido como ajuste de superfície. Cada função de ajuste, geralmente um polinômio, é definida utilizando-se os vértices dos elementos e em muitos casos os vértices dos elementos vizinhos também (FELGUEIRAS, 2001).

A geração de uma grade regular ou retangular deve ser efetuada quando os dados amostrados na superfície não são obtidos com espaçamento regular. Assim, a partir das informações obtidas, gera-se uma grade que representa de maneira mais fiel possível, a superfície. Os valores iniciais a serem determinados são os espaçamentos nas direções x e y de forma que possam representar os valores próximos aos pontos da grade em regiões com grande variação e que, ao mesmo tempo, reduzam redundâncias em regiões quase planas. O espaçamento da grade, ou seja, a resolução em x ou y deve ser cuidadosamente determinada. Ao se gerar uma grade muito fina (isto é densa), ou seja, com distância entre os pontos muito pequena, existirá um maior número de informações sobre a superfície analisada necessitando maior tempo para sua geração. Ao contrário, considerando distância grande entre os pontos, será criada uma grade grossa que pode acarretar perda de informação. Desta forma para a resolução final da grade deve haver um compromisso entre a precisão dos dados e do tempo de geração da grade (MEDINA; MEDINA, 2007).

Uma grade regular retangular é um poliedro de faces retangulares. O processo de geração de uma grade regular consiste em estimar os valores de cota de cada ponto da grade a partir do conjunto de amostras de entrada. Quando se faz uso de todas as amostras para interpolar cada ponto da grade diz-se que a interpolação é global. Em geral

o conjunto de amostras pode ser muito grande e não homogêneo tornando a interpolação global pouco apropriada em relação ao tempo de processamento computacional e precisão do modelo. Por exemplo, para uma grande quantidade de amostras, fica bastante difícil definir-se uma função polinomial capaz de representar satisfatoriamente todas as variações espaciais do fenômeno em estudo. Assim é muito comum utilizar-se interpolação local para o cálculo de cota de cada elemento da grade. Neste caso, o valor de cota de cada elemento da grade é estimado a partir de uma quantidade preestabelecida de amostras vizinhas mais próximas do elemento. Um modelo de grade regular retangular pode ser gerado a partir de um conjunto de amostras regularmente espaçadas ou a partir de um conjunto de amostras irregularmente espaçadas. Para se gerar grades regulares retangulares a partir de amostras irregularmente espaçadas é comum definir-se funções interpolantes simples (por exemplo: médias ponderadas, splines, etc.) e utilizá-las localmente. É importante notar que a estimativa da cota z de cada ponto da grade é realizada a partir de amostras vizinhas locais, mas uma análise global das amostras é sempre necessária para se encontrar essa vizinhança (FELGUEIRAS, 2001).

As grades irregulares são utilizadas quando se requer maior precisão na análise quantitativa dos dados. Uma grade irregular triangular é um poliedro de faces triangulares. Para Felgueiras (2001), em um modelo de grade irregular triangular os pontos amostras são conectados por linhas para formar triângulos. Assim, diferentemente da geração de grade regular, os valores de cota dos vértices dos elementos triangulares da malha triangular não precisam ser estimados por interpolações. Adotando-se critérios específicos para construção da rede triangular pode-se chegar a malhas únicas sobre o mesmo conjunto de amostras. Uma dessas malhas, muito utilizada na prática nos SIG's atualmente em uso profissional ou científico, é a malha de Delaunay, mais conhecida como triangulação de Delaunay. O critério utilizado na triangulação de Delaunay é o de maximização dos ângulos mínimos de cada triângulo. Isto é equivalente a dizer que, a malha final, deve conter triângulos o mais próximo de equiláteros possível evitando-se a criação de triângulos afinados, ou seja, triângulos com ângulos internos muito agudos. Existem vários métodos de implementação da triangulação de Delaunay. Esses métodos podem ser classificados em dois tipos básicos: algoritmo de passo único e algoritmo de dois passos. Os algoritmos de passo único criam a triangulação de Delaunay num único etapa, aplicando o critério de Delaunay durante a construção da triangulação. Os métodos

de dois passos geram uma triangulação inicial qualquer e numa segunda etapa transformam-na numa triangulação de Delaunay.

Medina e Medina (2007) afirmam que quanto mais equiláteras forem as faces triangulares, maior a exatidão com que se descreve a superfície. O valor numérico (atributo z) para qualquer ponto da superfície é então estimado, com o uso de interpoladores, a partir das faces triangulares. Este tipo de representação, normalmente, é a mais adequada para representação do relevo, devido à sua complexidade.

A Figura 2.7 ilustra um exemplo de uma grade regular, na imagem à esquerda, e de uma grade irregular, na imagem à direita.

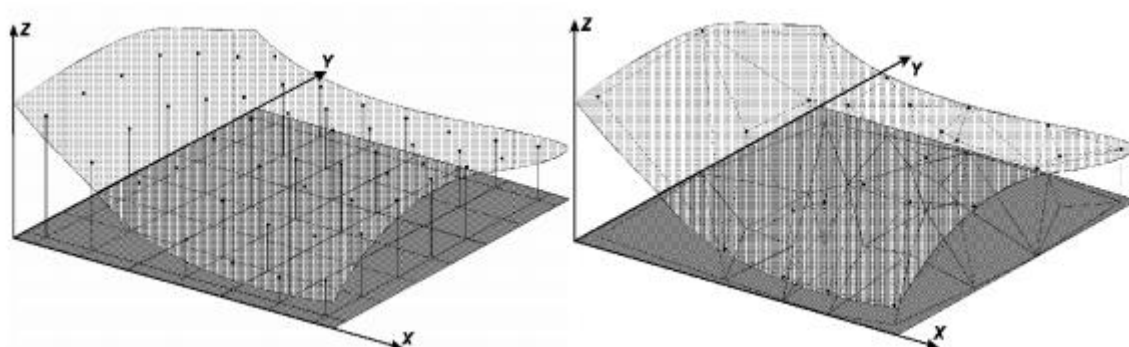


FIGURA 2.7 - GRADE REGULAR (ESQUERDA) E GRADE IRREGULAR (DIREITA).
FONTE: Zanardi (2006).

2.2.5 Ortofoto digital

Para Palermo e Leite (2013), a projeção de uma fotografia é em perspectiva quanto os raios de luz que definem um objeto no plano da imagem se cruzam em um ponto, o centro perspectivo. Considerando uma fotografia aérea, a projeção perspectiva ocasiona o efeito do deslocamento do relevo, em que pontos com a mesma posição planimétrica, mas com diferentes altitudes, são representados em posições diferentes.

De acordo com Lima *et al.* (2010), as fotografias, em seu estado bruto, não podem substituir, por exemplo, mapas topográficos de forma ideal, devido a tomada da fotografia representar uma realidade gerada a partir de uma projeção cônica central, enquanto o mapa topográfico é gerado em projeção ortogonal à superfície mapeada.

Dessa forma, o princípio básico de produção de uma ortofoto digital consiste no processo de eliminação dos deslocamentos devido à inclinação e ao relevo, de fotografias

em perspectiva que formam uma única imagem. Consequentemente, podem ocorrer variações em escala e na posição planimétrica dos pontos que formam a ortofoto.

Segundo Arruda e Hasegawa (2000), o princípio da produção de ortofoto digital consiste em transferir tons de cinza de uma imagem aérea digital para uma malha fina e regular, que representa a projeção ortogonal do terreno, ou seja, as coordenadas planas da ortofoto. Para isto são necessários: a imagem digital da área, os valores das orientações interior e exterior e o modelo digital do terreno.

As ortofotos podem ser obtidas através de dois métodos: direto e inverso. O método direto consiste, inicialmente, em projetar os pixels da imagem de entrada para a ortofoto digital aplicando-se as correções de erros sistemáticos através da equação de colinearidade inversa, gerando uma malha irregular no referencial da ortofoto digital (ARRUDA JR, 2002).

Segundo Almeida (1989), identifica-se três etapas no método direto, a saber: transformação do referencial imagem digital para o referencial fotogramétrico; transformação do referencial fotogramétrico para o referencial da ortofoto digital; e reamostragem da malha da ortofoto digital.

Para Arruda Jr (2002), o método indireto consiste, inicialmente, na busca dos pixels da ortofoto digital na imagem digital original, através da equação de colinearidade direta, e um processo “inverso” de correção de erros sistemáticos. Em outras palavras, é necessário introduzir todos os erros sistemáticos para encontrar, na imagem bruta de entrada, a posição correta do ponto projetado. Posteriormente, é necessário aplicar algum método de interpolação de tons de cinza, pois os pixels da malha regular da ortofoto digital, não necessariamente, possuem posição correspondente ao centro de um pixel na imagem de entrada. As etapas deste método são: transformação de pixels do referencial da ortofoto digital para o referencial fotográfico; transformação do referencial fotográfico para o referencial da imagem digital, utilizando-se a posição altimétrica do ponto na ortofoto através do MDT; e reamostragem radiométrica.

O método indireto realiza, em relação ao método direto, um processo inverso para transferência dos tons de cinza da imagem de entrada para a ortofoto digital. A segunda etapa deste método corresponde à primeira etapa do método direto, só que agora é realizado no sentido “inverso” permitindo a transformação dos pixels projetados do referencial fotográfico para o referencial da imagem digital. A terceira etapa deste método consiste na reamostragem dos pixels da ortofoto digital (ARRUDA JR, 2002).

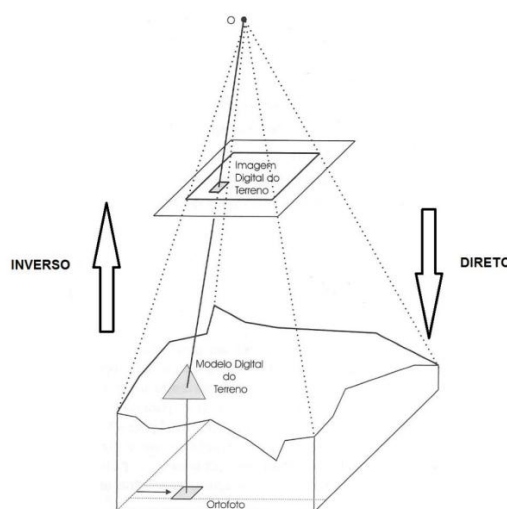


FIGURA 2.8 - MÉTODO DIRETO E INVERSO DE GERAÇÃO DE ORTOFOTO.
 FONTE: Palermo e Leite (2013).

2.3 CONTROLE DE QUALIDADE DE PRODUTOS CARTOGRÁFICOS

Segundo Antunes e Lingnau (1997), um mapeamento só deve ser utilizado como fonte fidedigna de informações quando associado a processos de avaliação da acurácia dos dados que o compõem. Acredita-se que a observância de padrões avaliadores de acurácia seja adequada para o processo de entrada, edição e controle de qualidade, pois certamente dá o real valor da informação cartográfica digital.

Segundo Thapa e Bossler (1992), avaliação da qualidade dos dados espaciais geralmente é efetuada com base em cinco componentes fundamentais: completude, consistência lógica, exatidão posicional, exatidão temporal e exatidão temática. Porém, quando se trata da avaliação da qualidade dos dados de informação geográfica, seja para os SIG's ou para a produção cartográfica, a qualidade posicional vem sempre em primeira instância (ROBERTO, 2013).

De acordo com Dalmolin e Leal (2001), no Brasil, o que se praticava em termos de controle de qualidade de produtos cartográficos divergia dos padrões internacionais, visto que as nossas organizações não tinham tradição neste controle. Dessa forma, o que se verificava no ato da contratação de serviços eram exigências mínimas com relação à qualidade do produto. O produtor, por meio de procedimentos próprios, controlava o processo, mas geralmente não controlava o produto.

Atualmente, o conceito de avaliação da qualidade da informação geográfica é visto em uma perspectiva mais ampla, tornando-se uma grande preocupação no

mapeamento digital. Durante o processo de produção de informações georreferenciadas o controle de qualidade é uma das tarefas principais (ROBERTO, 2013).

Rocha (2002) define a qualidade da posição (exatidão posicional) das informações de uma ortofoto digital como sendo o principal parâmetro que este produto deve apresentar para satisfazer plenamente as necessidades dos usuários. Isto se origina, inicialmente, na aquisição dos dados georreferenciados que empregam métodos e instrumentos embutidos com os respectivos erros sistemáticos, grosseiros e aleatórios (acidentais).

Andrade (2003) apresenta o termo exatidão cartográfica como sinônimo de acurácia, que é o afastamento que, como um todo, a ortofoto teria da verdade topográfica, enquanto que a precisão refere-se unicamente à dispersão de valores observados, no caso, dos erros nos vários pontos da carta.

Os testes estatísticos para avaliar precisão não objetivam apurar erros isoladamente, mas considerá-los globalmente como um conjunto de erros e se baseiam na análise do desvio padrão. Os testes de acurácia também são conduzidos observando o erro médio cometido entre o posicionamento das feições e suas posições equivalentes no terreno, obtidas por levantamentos GNSS. Supre-se com este teste a lacuna deixada pelo produtor, além de dar credibilidade ao produto gerado (DAMOLIN e LEAL, 2001).

2.3.1 Padrão de exatidão cartográfica

O Brasil possui uma legislação que contempla a preocupação quanto a qualidade dos produtos cartográficos gerados, os quais devem apresentar os parâmetros mínimos necessários à satisfação das necessidades dos usuários.

O Decreto nº 89.817 (Anexo I), de 20 de junho de 1984, estabelece as Instruções Reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia Brasileira através de procedimentos e padrões a serem obedecidos na elaboração e apresentação de documentos cartográficos no Território Brasileiro, através do Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC), e uma classificação das cartas classes distintas.

O PEC é um indicador estatístico de dispersão, relativo a 90% de probabilidade, que define a exatidão de trabalhos cartográficos. A probabilidade de 90% corresponde a 1,6449 vezes o Erro Padrão ($PEC = 1,6449 EP$). O Erro-Padrão isolado num trabalho cartográfico, não ultrapassará 60,8% do Padrão de Exatidão Cartográfica. Para efeito das

presentes Instruções, consideram-se equivalentes as expressões Erro-Padrão, Desvio-Padrão e Erro-Médio-Quadrático.

Conforme a escala de trabalho, a escala da carta que está sendo utilizada ou mesmo para a escala de saída de um projeto admite-se um erro de posicionamento das feições gráficas conhecidas com o PEC. Esse erro está diretamente ligado à classificação de uma carta quanto à sua exatidão e é utilizado como medida básica para o controle de qualidade de um trabalho cartográfico.

Em junho de 2011, a CONCAR criou a norma Especificação Técnica para a Aquisição de Dados Geoespaciais Vetoriais (ET-ADGV). Esta norma tem como objetivo atualizar sua antecessora, pois a anterior não estava atendendo as necessidades atuais, aplicadas à era digital. Nesse sentido, passou-se a considerar que com o avanço tecnológico foram eliminados erros inerentes aos processos antigos e inserindo os erros, menores, dos processos atuais.

A norma ET-ADGV (CONCAR-EB, 2011) criou um novo indicador estatístico, o Padrão de Exatidão Cartográfica dos Produtos Cartográficos Digitais (PEC-PCD). Este indicador continua a ser calculado pelo produto do desvio padrão e a constante 1,6449 e num nível de confiança de 90%. A norma torna-se mais rigorosa com os valores do PEC-PCD, inclusive criando uma nova classe de acurácia, sendo agora os produtos cartográficos classificados nas classes A, B, C e D.

Portanto, para avaliar um produto cartográfico digital de acordo com a ET-ADGV, basta calcular o PEC-PCD e comparar com o valor correspondente à escala do produto. As escalas que a norma apresenta os valores do PEC-PCD são 1:1.000, 1:2.000, 1:5.000, 1:10.000, 1:25.000, 1:50.000, 1:100.000 e 1:250.000. Contudo a norma não especifica o número de pontos de controle que deve conter a amostra e não deixa claro como é a forma de avaliação das coordenadas planimétricas (se isoladamente ou de modo conjunto) (PEREIRA e NERO, 2012).

No Quadro 2.1 o PEC-PCD Planimétrico e o EP das classes “B”, “C” e “D” correspondem, nessa ordem, as classes “A”, “B”, “C” do PEC Planimétrico previstas no Decreto nº 89.817, de 20 de junho de 1984.

QUADRO 2.1- PADRÃO DE EXATIDÃO CARTOGRÁFICA DA PLANIMETRIA DOS PRODUTOS CARTOGRÁFICOS DIGITAIS.

PEC ⁽¹⁾	PEC - PCD	1:1.000		1:2.000		1:5.000		1:10.000		1:25.000		1:50.000		1:100.000		1:250.000	
		PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)
-	A ⁽²⁾	0,28	0,17	0,56	0,34	1,40	0,85	2,80	1,70	7,00	4,25	14,00	8,51	28,00	17,02	70,00	42,55
A	B ⁽¹⁾	0,50	0,30	1,00	0,60	2,50	1,50	5,00	3,00	12,50	7,50	25,00	15,00	50,00	30,00	125,00	75,00
B	C ⁽¹⁾	0,80	0,50	1,60	1,00	4,00	2,50	8,00	5,00	20,00	12,50	40,00	25,00	80,00	50,00	200,00	125,00
C	D ⁽¹⁾	1,00	0,60	2,00	1,20	5,00	3,00	10,00	6,00	25,00	15,00	50,00	30,00	100,00	60,00	250,00	150,00

FONTE: CONCAR-EB (2011).

O Quadro 2.2 estabelece o PEC-PCD para os Modelos Digitais de Terreno (MDT), de Elevação (MDE) e de Superfície (MDS), assim como para os Pontos Cotados.

QUADRO 2.2- PADRÃO DE EXATIDÃO CARTOGRÁFICA ALTIMÉTRICA DOS PONTOS COTADOS E DO MDT, MDE E MDS PARA A PRODUÇÃO DE PRODUTOS CARTOGRÁFICOS DIGITAIS.

PEC - PCD ⁽³⁾	1:1.000 (Eqd = 1 m)		1:2.000 (Eqd = 1 m)		1:5.000 (Eqd = 2 m)		1:10.000 (Eqd = 5 m)		1:25.000 (Eqd = 10 m)		1:50.000 (Eqd = 20 m)		1:100.000 (Eqd = 50 m)		1:250.000 (Eqd = 100 m)	
	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)
A	0,27	0,17	0,27	0,17	0,54	0,34	1,35	0,84	2,70	1,67	5,50	3,33	13,70	8,33	27,00	16,67
B	0,50	0,33	0,50	0,33	1,00	0,66	2,50	1,67	5,00	3,33	10,00	6,66	25,00	16,66	50,00	33,33
C	0,60	0,40	0,60	0,40	1,20	0,80	3,00	2,00	6,00	4,00	12,00	8,00	30,00	20,00	60,00	40,00
D	0,75	0,50	0,75	0,50	1,50	1,00	3,75	2,50	7,50	5,00	15,00	10,00	37,50	25,00	75,00	50,00

FONTE: CONCAR-EB (2011).

No Quadro 2.3 o PEC-PCD Altimétrico e o EP das classes “A”, “B” e “C” correspondem, respectivamente, às classes “A”, “B” e “C” do PEC Altimétrico previstas no Decreto 89.817, de 20 de junho de 1984.

QUADRO 2.3- PADRÃO DE EXATIDÃO CARTOGRÁFICA DA ALTIMETRIA (CURVAS DE NÍVEL) DOS PRODUTOS CARTOGRÁFICOS DIGITAIS.

PEC ⁽¹⁾	PEC- PCD	1:1.000 (Eqd = 1 m)		1:2.000 (Eqd = 1 m)		1:5.000 (Eqd = 2 m)		1:10.000 (Eqd = 5 m)		1:25.000 (Eqd = 10m)		1:50.000 (Eqd = 20m)		1:100.000 (Eqd = 50m)		1:250.000 (Eqd = 100m)	
		PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)
A	A	0,50	0,33	0,50	0,33	1,00	0,67	2,50	1,67	5,00	3,33	10,00	6,67	25,00	16,67	50,00	33,33
B	B	0,60	0,40	0,60	0,40	1,20	0,80	3,00	2,00	6,00	4,00	12,00	8,00	30,00	20,00	60,00	40,00
C	C	0,75	0,50	0,75	0,50	1,50	1,00	3,75	2,50	7,50	5,00	15,00	10,00	37,50	25,00	75,00	50,00
	D ⁽⁴⁾	1,00	0,60	1,00	0,60	2,00	1,20	5,00	3,00	10,00	6,00	20,00	12,00	50,00	30,00	100,00	60,00

(1) Valores determinados, ou adaptados, com base nos valores do PEC Planimétrico previstos no Decreto 89.817, de 20 de junho de 1984.

(2) Produtos Cartográficos Digitais, baseado nos valores utilizados pelo “Ordinance Survey” e “National Joint Utilities Group” do Reino Unido, extraídos de ARIZA (2002, pág. 87, no qual Exatidão Cartográfica = 0,28 mm na escala do produto cartográfico e EP = 0,17 mm na escala do produto cartográfico).

(3) Valor calculado levando-se em consideração os erros existentes nos processos de medição de pontos apoio e de fototriangulação.

(4) Valores do PEC-PCD iguais a 1 equidistância e EP de 3/5 da equidistância do produto cartográfico.

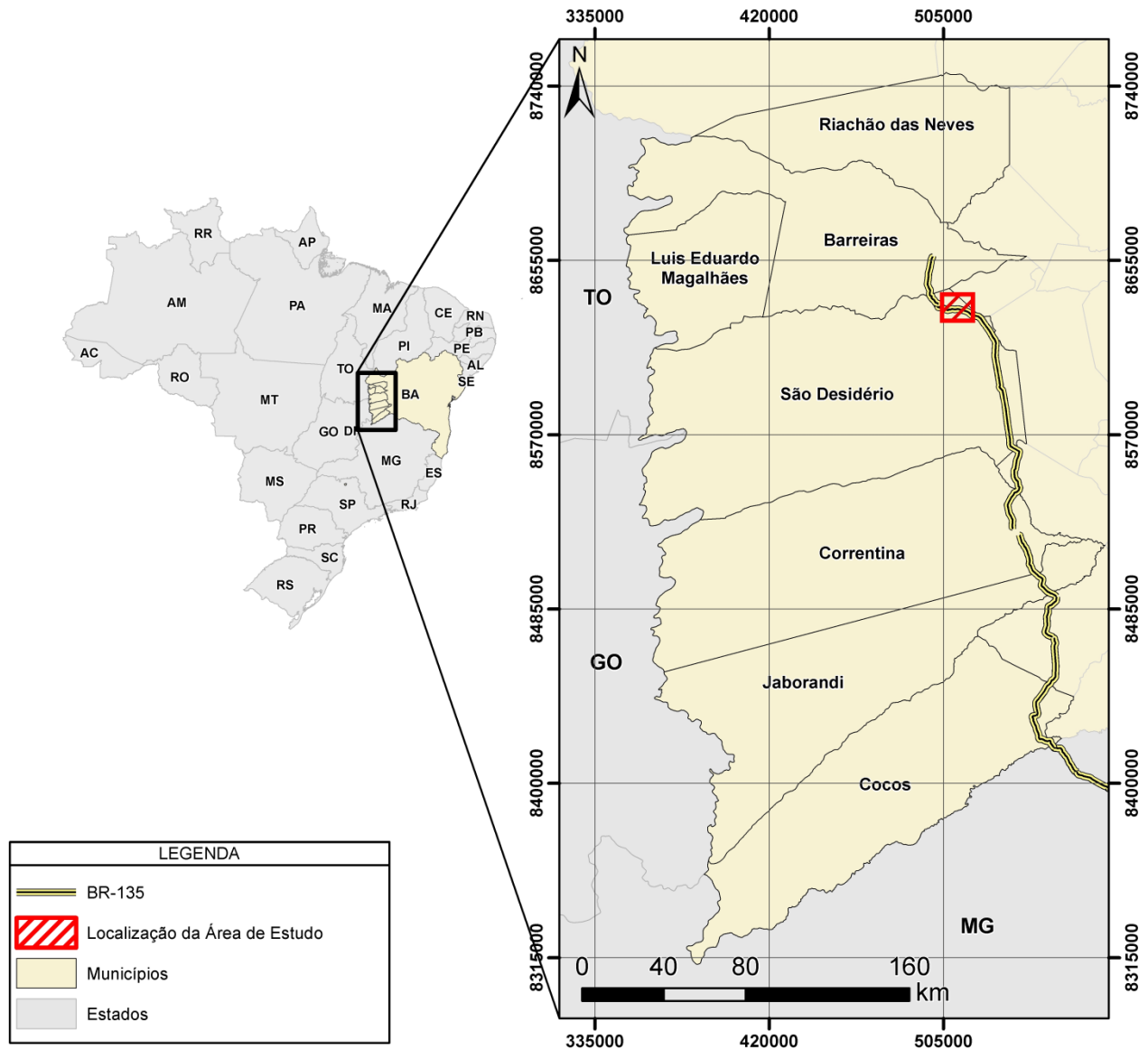
FONTE: CONCAR-EB (2011).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo compreendeu, aproximadamente, 3.924.000 m² (3,924 km²) de uma região rural do município de São Desidério, cuja a base de dados cartográficos é desatualizada na mesorregião do extremo Oeste Baiano. São Desidério/BA limita-se com o município de Barreiras/BA ao norte, Catolândia a nordeste, Baianópolis a leste, Correntina a sul, Santa Maria da Vitória a sudeste, Luiz Eduardo Magalhães a noroeste, e com os estados de Goiás e Tocantins a oeste, conforme ilustra a Figura 3.1.

Neste contexto, procurou-se evidenciar a área de estudo através de uma região rural, rica em cavidades subterrâneas (cavernas), com grandes extensões de calcário e com intenso processo de dolinamento, caracterizada pelo Sistema Cárstico do Rio João Rodrigues (SCJR), visando à verificação de tais feições através do processamento das imagens. A Figura 3.2 apresenta a rodovia federal BR-135/BA (A), a demarcação (D) e rastreio (B) dos pontos de apoio e de verificação, e a opção em se executar o voo em regiões afastadas de centros urbanos (C).



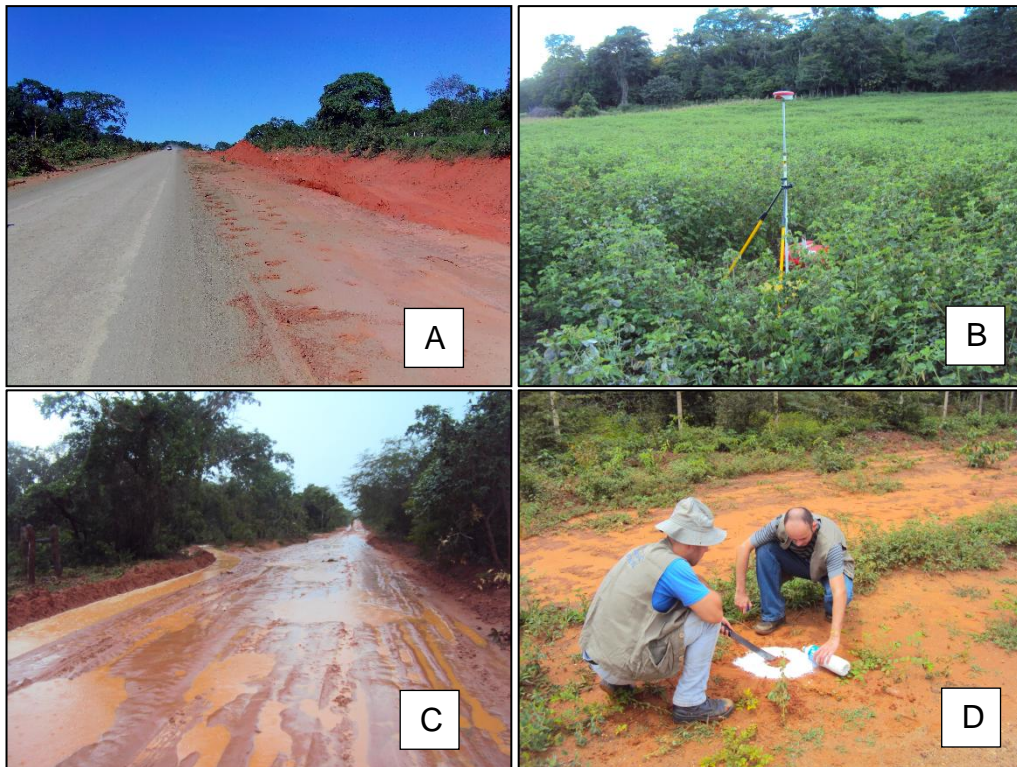


FIGURA 3.2 - ÁREA DE ESTUDO COMPREENDENDO O SISTEMA CÁRSTICO DO RIO JOÃO RODRIGUES (SCRJR) E RODOVIA FEDERAL BR-135/BA, NO MUNICÍPIO DE SÃO DESIDÉRIO/BA.

FONTE: O autor (2014).

3.2 MATERIAIS

Para o desenvolvimento deste trabalho foram utilizados os equipamentos e materiais descritos no Quadro 3.1 .

Qtd.	Materiais	Propriedade
01	Microcomputador Intel Core i-7 @ 3,5 GHz - 16 Gb Ram Ge-Force GTX 780 Ti - HDD 1Tb;	ITTI / UFPR
01	Software fotogramétrico de código fechado - Agisoft Photo Scan Professional Version 1.0.4 (64 bits) 2014;	ITTI / UFPR
01	Sistema de Veículo Aéreo Não Tripulado (SISVANT) - Smartbird X-260;	Softmapping Engenharia
600	Fotografias Aéreas de Pequeno Formato obtidas com o SISVANT, possuindo a dimensão de 4.912 x 3.264 pixels, com representação de cores em RGB, formato *.jpg;	ITTI / UFPR
01	Câmera Digital Convencional (não métrica e não calibrada) – Marca: Sony Nex-3 16 Mp., distância focal de 16mm;	Softmapping Engenharia
02	Receptores GNSS L1/L2 Leica 900 CS;	Lab. Topografia / UFPR
27	Pré-Sinalizadores dos Pontos de Controle (Lonas e Cal).	ITTI / UFPR
01	Software SIG de código fechado - ArcGIS v.10.2.2.3552	ITTI / UFPR
01	Software SIG de código fechado - Global Mapper v.15.0 64 bits	ITTI / UFPR

QUADRO 3.1 - EQUIPAMENTOS E MATERIAIS UTILIZADOS NO ESTUDO.
FONTE: O autor (2014).

3.3 MÉTODOS

Os métodos empregados para a execução deste trabalho estão descritos na Figura 3.3. Para tanto, foi realizado no mês de Outubro de 2014 a campanha de campo para a aquisição dos dados, entre os Km 218 e Km 221 da rodovia federal BR-135/BA, no Sistema Cárstico do Rio João Rodrigues em São Desidério/BA.

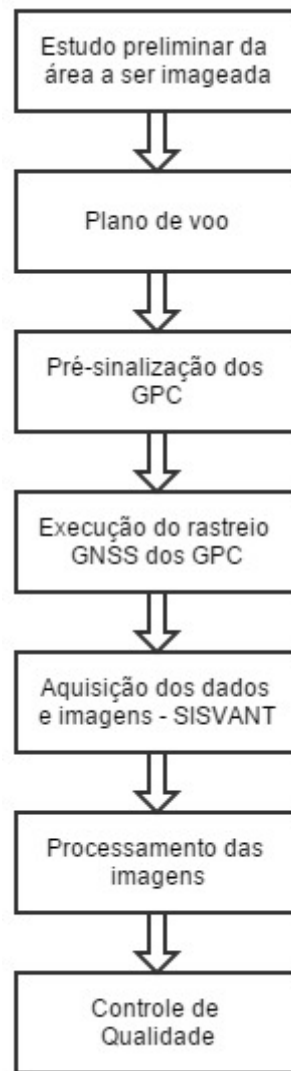


FIGURA 3.3 - ORGANOGRAMA DOS MÉTODOS EMPREGADOS.
FONTE: O autor (2014).

3.3.1 Estudo preliminar da área a ser imageada

O estudo preliminar foi realizado com o intuito de se obter a delimitação da área de interesse, a altitude média do terreno e a verificação de possíveis problemas para o imageamento, tais como: obstáculos naturais (picos, cumes), cabos elétricos, entre outros. Esta análise foi de extrema importância, pois de posse de tais informações foi possível planejar adequadamente a trajetória do SISVANT.

3.3.2 Plano de voo

O plano de voo consistiu no procedimento de confecção do traçado que o SISVANT percorreu para cumprir o imageamento dentro da área de interesse. Para tanto certificou-se das condições meteorológicas e atmosféricas no dia da missão, visto que o principal fator para a boa tomada das fotografias é executar missões em dias de sol e sem vento. Ventos com intensidade superior a 30% da velocidade de deslocamento da aeronave, normalmente provocam desvios de trajetória, prejudicando o alinhamento sequencial das imagens (BRASIL, 2012).

A determinação do tamanho do pixel (GSD - *Ground Sample Distance*) ocorreu em função da escolha do produto a ser avaliado, ou seja, em função da qualidade esperada para a ortofoto. O fator “relevo” influenciou na determinação da altitude média de voo de 300 metros. Tal escolha se baseou no relevo da área de estudo ser caracterizado como plano, visto que quando se tem variações de altitude a partir de 50 metros ocorrem graves implicações na escala das fotos e em suas sobreposições. Para calcular o GSD é necessário considerar os seguintes elementos: o tamanho do pixel (TP), a distância focal da câmera (f) e altura de voo (H). De acordo com Santos (2014), pode-se considerar que a distância focal da câmera é a distância entre o sensor e o centro óptico da câmera e a altura de voo é a distância entre o sensor e a superfície física da Terra, conforme ilustra a Figura 3.4.

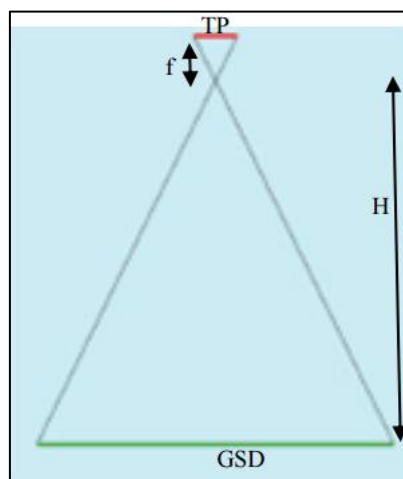


FIGURA 3.4 - RELAÇÃO ENTRE A DISTÂNCIA FOCAL DA CÂMARA, TAMANHO DO PIXEL E ALTURA DE VOO, PARA O CÁLCULO DO GSD.
FONTE: Santos (2014).

Sendo assim, por semelhança de triângulos tem-se que a razão entre o GSD e o tamanho do pixel é igual a razão entre a altura de voo e a distância focal da câmera digital.

A equação (3.1) apresenta as relações supracitadas. E a equação (3.2) define o cálculo do GSD (SANTOS, 2014).

$$\frac{GSD}{TP} = \frac{H}{f} \quad (3.1)$$

$$GSD = \frac{H \cdot TP}{f} \quad (3.2)$$

Onde:

- TP = tamanho físico do pixel no CCD (mm);
- f = distância focal da câmera (mm);
- H = altura de voo (m).

Santos (2014) determina o tamanho do pixel através da equação (3.3):

$$TP = \frac{x}{NTC} = \frac{y}{NTL} \quad (3.3)$$

Onde:

- x, y = dimensões físicas do CCD (mm);
- NTC = número total de colunas;
- NTL = número total de linhas.

Dessa forma, os cálculos para determinação do tamanho do pixel encontram-se nas equações (3.4) e (3.5) e para encontrar o GSD na equação (3.6).

$$TP_x = \frac{x}{NTC} = \frac{23,4mm}{4912} = 0,00477mm/pixel = 4,77\mu m / pixel \quad (3.4)$$

$$TP_y = \frac{y}{NTC} = \frac{15,6mm}{3264} = 0,00477mm/pixel = 4,77\mu m / pixel \quad (3.5)$$

$$GSD = \frac{4,77 \cdot 10^{-6} \cdot 300}{0,016} = 0,089m = 8,9cm \cong 9cm \quad (3.6)$$

Portanto, o tamanho físico do pixel correspondeu a 4,77 micrometros/pixel e o tamanho do pixel no terreno (GSD) igual a 9 cm.

Com as dimensões físicas do CCD, a distância focal e altura média de voo obtiveram-se as dimensões das fotografias no terreno através das equações (3.7) a (3.10).

$$\frac{\text{Dimensão CCD "x"}}{\text{Distância focal}} = \frac{\text{Dimensão Fotografia "x"}}{\text{Altura de voo}} \quad (3.7)$$

$$\frac{0,023mm}{0,016mm} = \frac{x}{300m} \rightarrow x = 438,75 m \quad (3.8)$$

$$\frac{\text{Dimensão CCD "y"}}{\text{Distância focal}} = \frac{\text{Dimensão Fotografia "y"}}{\text{Altura de voo}} \quad (3.9)$$

$$\frac{0,0156mm}{0,016mm} = \frac{y}{300m} \rightarrow y = 292,5 m \quad (3.10)$$

Dessa forma, cada fotografia representou no terreno aproximadamente 440 metros, no eixo x, por 292 metros, no eixo y. Com base nas informações do GSD e dimensões da fotografia no terreno, o plano de voo foi realizado de tal maneira que os recobrimentos entre fotos e faixas planejados fossem de 80% e 50%, respectivamente. Sendo possível, dessa forma, a identificação de pontos homólogos em várias fotos consecutivas.

A Figura 3.5 ilustra as sobreposições laterais e longitudinais após a realização do imageamento. Após calcular a média das sobreposições entre todas as fotografias, os resultados indicaram uma sobreposição lateral de 46,5% e longitudinal de 79%. A Figura 3.6 ilustra, de maneira geral, os valores obtidos.

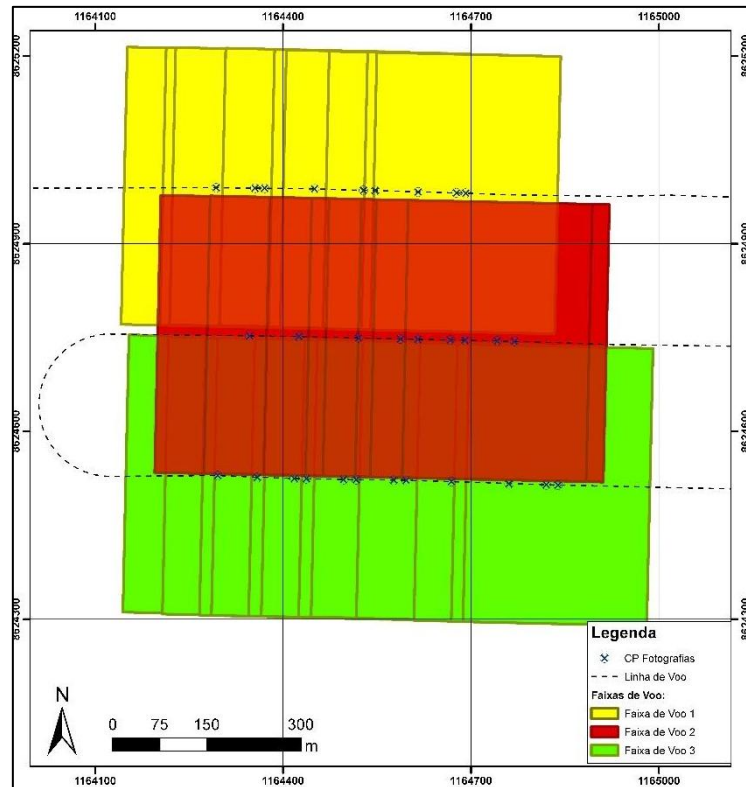


FIGURA 3.5 - EXEMPLO DE SOBREPOSIÇÃO LONGITUDINAL E LATERAL PARA 3 FAIXAS DE VOO.
FONTE: O autor (2014).

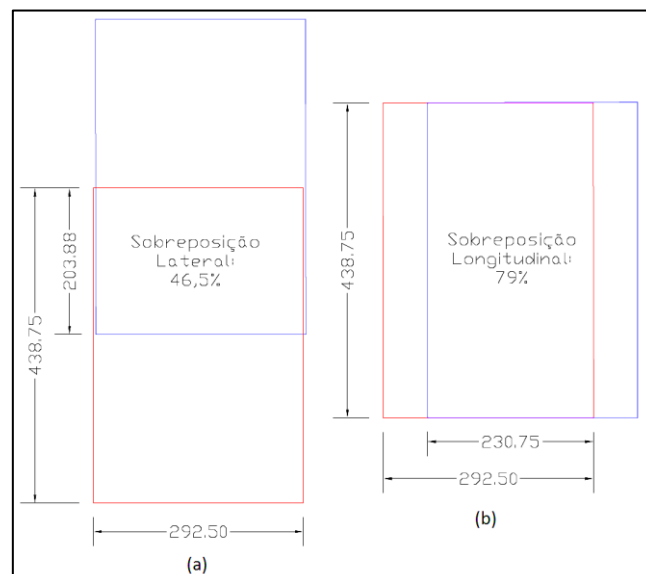


FIGURA 3.6 - VERIFICAÇÃO, APÓS A REALIZAÇÃO DO IMAGEAMENTO AÉREO, DÁS SOBREPOSIÇÕES LATERAL (A) E LONGITUDINAL (B) PLANEJADAS.
FONTE: O autor (2014).

Para a área de estudo do presente trabalho, foram definidas 10 faixas de voo (60 fotografias por faixa, em média), com comprimento, aproximado, de 2.000 metros e 218 metros de largura cada (Figura 3.7).

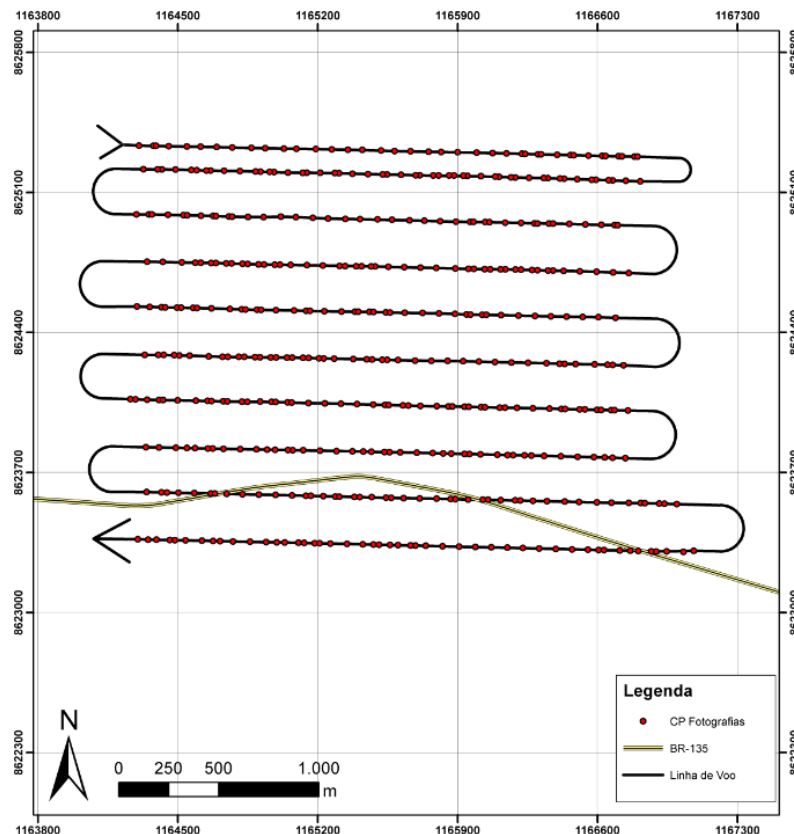


FIGURA 3.7 - PLANO DE VOO E TOMADA DAS FOTOGRAFIAS AÉREAS DE PEQUENO FORMATO.

FONTE: O autor (2014).

3.3.3 Pré-sinalização dos pontos de controle

A pré-sinalização é uma marcação artificial no terreno possível de ser identificada na imagem ou fotografia aérea. O objetivo de sinalizar os pontos foto-identificáveis foi proporcionar coordenadas precisas para solucionar problemas de rigidez geométrica, bem como se efetuar o controle da informação extraída.

A localização das marcas foi planejada em função do plano de voo da área de estudo e seguiu os pré-requisitos de distribuição geral e localização estratégica dos pontos de controle e amarração dos blocos. As marcas foram dispostas em terreno plano, com boa visibilidade em planta.

A metodologia de implantação das marcas artificiais no terreno seguiu as orientações de Costa e Silva (2012). A resolução da imagem digital sobre a qual serão medidas as coordenadas da foto foi o critério de partida para determinar a dimensão o alvo pré-sinalizado.

Dessa forma, A Figura 3.8 ilustra as marcas materializadas com cal e telas plásticas (lonas pretas e amarelas) (A). A cor amarela permitiu um contraste satisfatório

em relação à coloração predominante do entorno apresentam refletância destoante do solo da região (B e D). As dimensões escolhidas (60 cm x 40 cm) permitiram a localização das marcas, inclusive, em locais de difícil acesso, como topo de afloramentos calcáreos (C).



FIGURA 3.8 - PRÉ-SINALIZAÇÃO DA ÁREA DE INTERESSE COM CAL E LONA.
FONTE: O autor (2014).

A Figura 3.9 ilustra uma fotografia aérea e, em seu detalhe, a possibilidade de identificação das marcas devido às cores destoantes perante a vegetação em seu entorno.



FIGURA 3.9 - IDENTIFICAÇÃO DA PRÉ-SINALIZAÇÃO NAS FOTOGRAFIAS AÉREAS.
FONTE: O autor (2014).

3.3.4 Execução do rastreo dos pontos de controle do terreno (GCP)

A finalidade do apoio terrestre por GNSS (*Global Navigation Satellite System* ou Sistema de Navegação Global por Satélite) foi determinar uma rede de pontos de controle facilmente identificáveis nas fotografias e convenientemente distribuídos na área de estudo, dos quais se conheciam as exatas posições planimétricas no terreno e suas respectivas altitudes, possibilitando assim a posterior avaliação geométrica dos produtos cartográficos. A Figura 3.10 apresenta o rastreo dos pontos pré-sinalizados, através do posicionamento dos receptores nas marcas artificiais (A), de pontos de difícil acesso (B), através da instalação da base (D) e do rover (C).

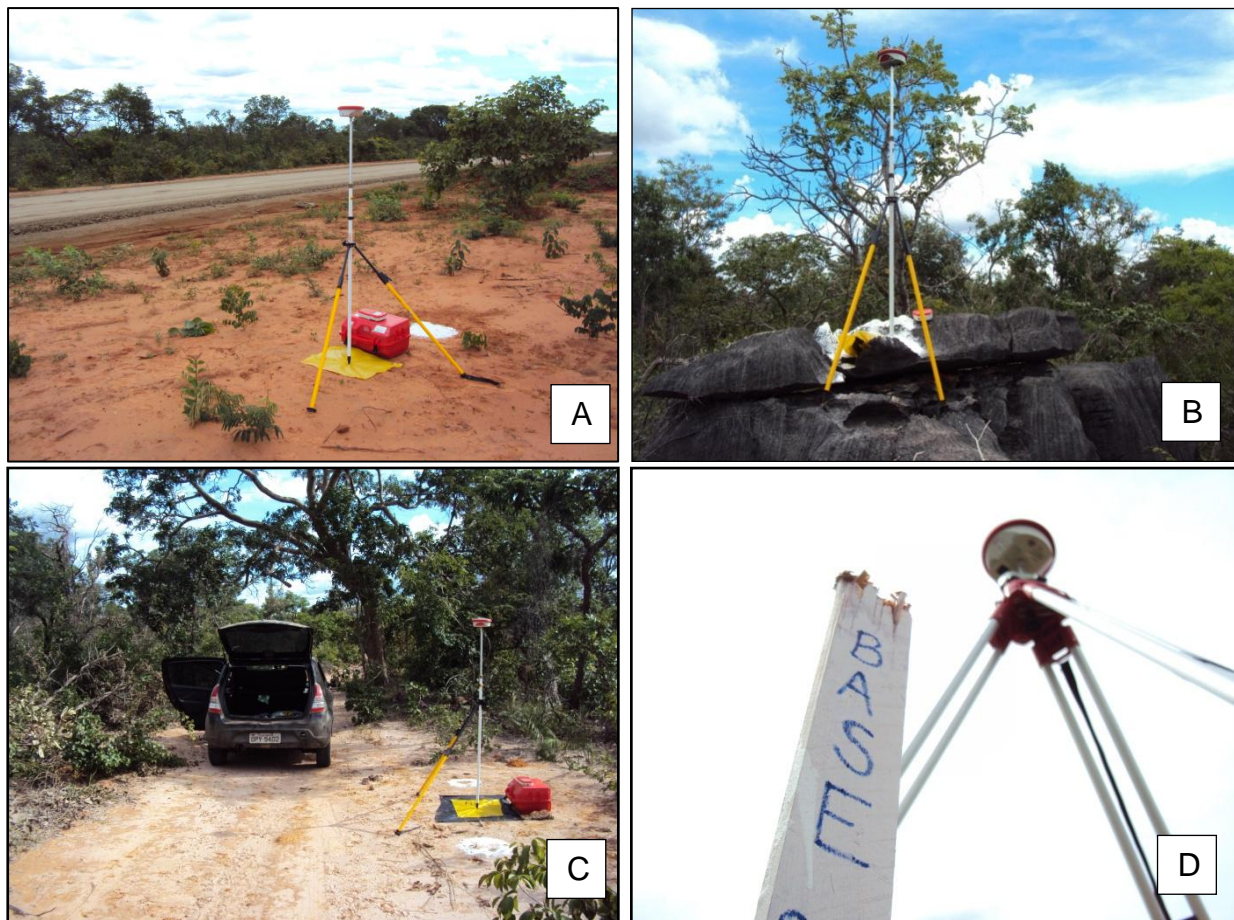


FIGURA 3.10 - RASTREIO GNSS PELO MÉTODO RELATIVO ESTÁTICO REALIZADO NA ÁREA DE ESTUDO.

FONTE: O autor (2014).

Foram coletados, através do método de posicionamento relativo estático com dois receptores GNSS L1/L2 Leica 900 CS, as coordenadas de 27 pontos de controle pré-sinalizados na área de estudo.

A Figura 3.11 apresenta a distribuição dos pontos de controle no terreno coletados para auxiliar no controle da qualidade geométrica no processo de geração da ortofotocarta.

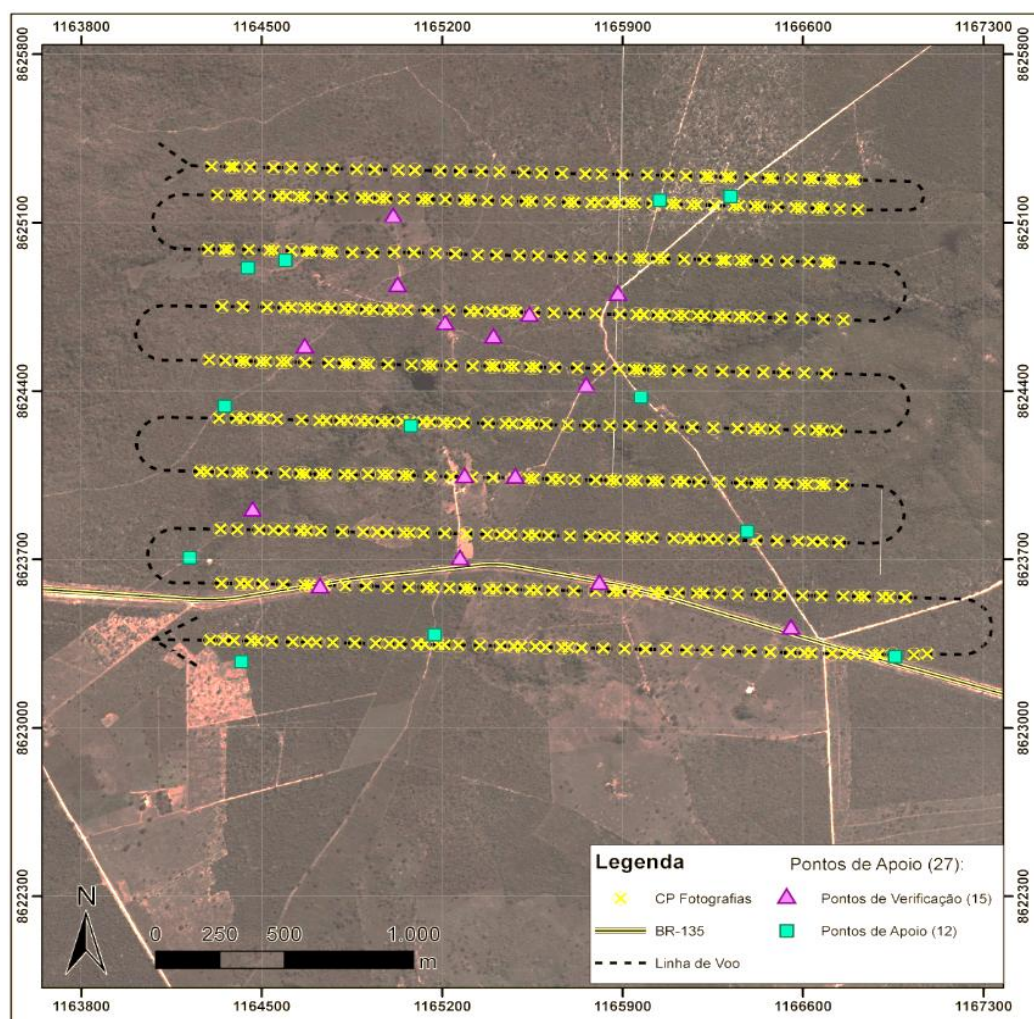


FIGURA 3.11 - DISTRIBUIÇÃO DOS PONTOS DE APOIO NA ÁREA DE ESTUDO.
FONTE: O autor (2014).

3.3.5 Aquisição dos dados e imagens através do SISVANT

Para a obtenção das fotografias foi utilizado um SISVANT, modelo Smartbird X-260 Softmapping & Aerial Propeller, fabricado pela Softmapping Engenharia, Cartografia e Geoprocessamento Ltda. As principais características do SISVANT são apresentadas na Tabela 3.1.

O SISVANT (Figura 3.12) é um sistema estruturalmente fabricado em fibra de carbono e polipropileno que permite a tomada de fotografias aéreas de pequeno formato com alta resolução e de forma rápida. Foi equipado com uma câmera digital convencional (não métrica e não calibrada) da marca Sony NEX-3 16 Mega Pixels e com um piloto automático com GNSS/INS integrados, com precisão nominal na ordem de 10 metros e 1°, respectivamente, para fornecer os parâmetros de posição e orientação da aeronave no

instante das tomadas da imagem. As principais características do SISVANT utilizado são detalhadas na Tabela 3.1.

TABELA 3.1 - PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DO SISVANT.

Envergadura	2,60 metros
Dimensões	260cm x 80cm x 15cm
Área de asa	4000 cm ²
Velocidade de lançamento	75 km/h
Velocidade de cruzeiro	85 km/h
Velocidade máxima	125 km/h
Velocidade de pouso	60 km/h
Altitude máxima de voo	1000 metros = 1 km
Peso	6 quilos
Autonomia	60 minutos = 03 Baterias Lithium
Vento	Resistência de até 80 km/h
Sistema de rádio frequência	2,4 Hz – alcance de até 14km

FONTE: O autor (2014).

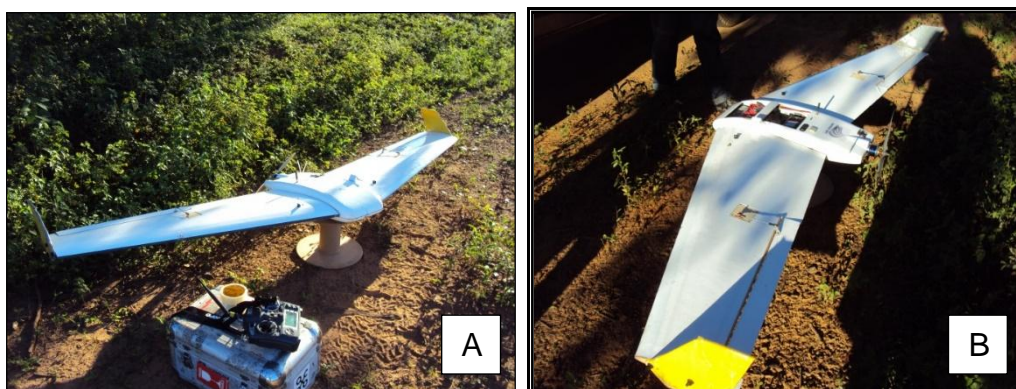


FIGURA 3.12 - SISVANT MODELO SMARTBIRD X-260. (A) VISTA DA FACE SUPERIOR; (B) VISTA DA FACE INTERIOR.

FONTE: O autor (2014).

As especificações técnicas da câmera digital (Figura 3.13) são apresentadas na Tabela 3.2.

TABELA 3.2 - ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS - SONY NEX-3.

Resolução	16,2 Mega pixels
Tipo de sensor	APS-C
Tamanho do sensor	23,4 mm x 15,6 mm
Tamanho máximo da imagem	4.912 x 3.264
Distância focal	16 mm
Peso	500 gramas

FONTE: Disponível em: <http://pdf.crse.com/manuals/4275473521.PDF>



FIGURA 3.13 – (A) CÂMERA DIGITAL CONVENCIONAL (NÃO MÉTRICA) SONY NEX-3; (B) ILUSTRAÇÃO DO FLASH.

FONTE: Disponível em: <http://pdf.crse.com/manuals/4275473521.PDF>

De acordo com Galo *et al.* (2008), a qualidade dos produtos fotogramétricos pode ser afetada quando do não conhecimento ou não utilização de seus parâmetros de orientação interior no processamento das imagens. Entretanto, conforme afirmou Roberto (2013), os parâmetros de calibração da câmera não representam um pré-requisito para a restituição tridimensional. Dessa forma, entende-se que quando se objetiva apenas representação de feições para fins de atualização de bases cartográficas quanto à defasagem temporal, a calibração pode ficar em segundo plano. Sendo assim, a avaliação dos dados brutos possibilita quantificar a potencialidade de um SISVANT de baixo custo, destacando a facilidade de aquisição e processamento das fotografias brutas advindas do sensor. No que diz respeito a aplicações de mapeamentos planialtimétricos, sabe-se que a qualidade das fotografias oriundas de câmeras não calibradas não é satisfatória tanto em sistemas autônomos, quanto com qualquer outro tipo de plataforma.

O Smartbird X-260 foi lançado através de uma catapulta (*bungee* – dimensões: 60 cm de largura x 60 cm de comprimento x 60 cm de altura) fabricada com canos de PVC, com um sistema de impulsão através de um elástico. O voo fotogramétrico foi totalmente autônomo com tomadas das imagens em posições espaciais previamente planejadas. A Figura 3.14 apresenta o sistema de lançamento.

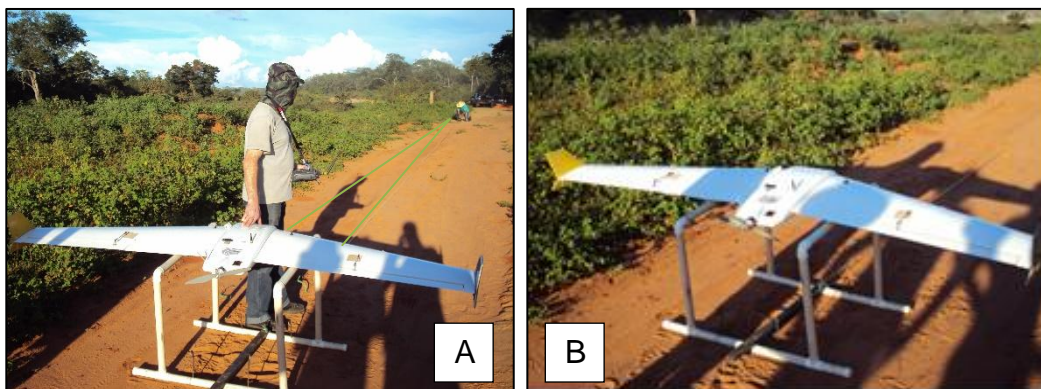


FIGURA 3.14 - SISTEMA DE LANÇAMENTO DO SISVANT ATRAVÉS DE UMA CATAPULTA E ELÁSTICO. (A) OPERADOR AGUARDANDO POSICIONAMENTO DO AUXILIAR PARA DECOLAGEM; (B) SUPORTE EM PVC.
FONTE: O autor (2014).

3.3.6 Processamento das imagens

O processamento das imagens obtidas com o SISVANT foi implementado com base na sequência de procedimentos apresentados na Figura 3.15. Todas as etapas aqui detalhadas visaram utilizar metodologias clássicas associadas à fotogrametria digital convencional com adaptação da computação gráfica por meio da utilização de um software aerofotogramétrico específico para plataformas autônomas.

A primeira etapa corresponde a seleção e a filtragem das fotografias. A seleção eliminou o número excessivo de fotografias obtidas durante o imageamento, decorrentes da alta taxa de sobreposição longitudinal. A filtragem foi realizada manualmente, antes das fotografias serem adicionadas à ferramenta computacional, excluindo aquelas que apresentaram problemas de qualidade decorrentes da inclinação da aeronave no momento da tomada da fotografia (fotografias inclinadas); da variação da altitude do SISVANT entre tomadas consecutivas (escala); e da deriva da mesma provocada pelo vento (arrasto).

Para este trabalho, as fotografias foram processadas através de algoritmos computacionais de classificações de padrões e reconstrução tridimensional do terreno, oriundos do software de código fechado Agisoft PhotoScan Professional Edition Version 1.0.4, ano de 2014.

As técnicas de busca de agrupamento são empregadas quando os padrões das classes são números reais que se “agrupam” no espaço n dimensional. A classificação de padrões utiliza a distância de funções para resolver o problema em que cada padrão de classe apresenta de modo claro, limitado grau de variabilidade.

- Sejam M os agrupamentos de padrões de classes, representados pelos conjuntos de padrão Z_1, Z_2, \dots, Z_M ;
- A distância Euclidiana entre padrões quaisquer “ x ” e cada conjunto Z_i será dada por:

$$D_i = \|x - Z_i\| = \sqrt{(x - Z_i)' \cdot (x - Z_i)} \quad (3.11)$$

Onde:

- $(x - Z_i)'$ é a transposta de $(x - Z_i)$.

A classificação por similaridade máxima estabeleceu a distância entre um padrão de pixel “ x ” de classificação desconhecida em relação ao conjunto de cada classe e nomeou o padrão à classe que está mais próxima (CASTRO; PADRO, 2002).

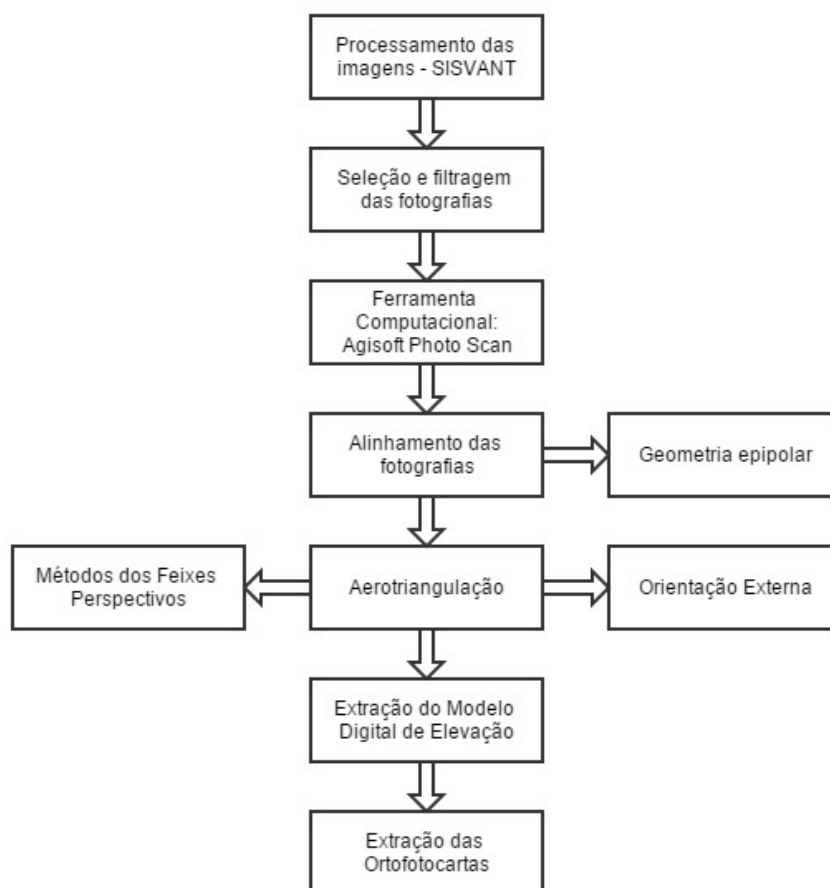


FIGURA 3.15 - ORGANOGRAMA DAS ETAPAS DE PROCESSAMENTO DAS IMAGENS.
FONTE: O autor (2014).

3.3.6.1 Experimento 01: utilizando os dados brutos oriundos do CP da câmera

Após a seleção e filtragem, as fotografias foram adicionadas no software e alinhadas através de um algoritmo que localiza os pontos homólogos (*matching points*) entre elas. O algoritmo efetua a caracterização de padrões por propriedades comuns efetivando-se mediante algumas “características principais”. Padrões pertencentes a uma mesma classe possuirão propriedades comuns de discriminação dessa classe. Desta forma, quando um padrão desconhecido é observado pelo sistema, suas características são extraídas e comparadas com aquelas armazenadas como discriminantes das classes (CASTRO; PRADO, 2002).

Neste experimento os dados de entrada foram os parâmetros de orientação exterior (POE), ou seja, as coordenadas (X_{cp}, Y_{cp}, Z_{cp}) do CP da câmera no momento da tomada de cada fotografia. Contudo, não foram empregados os valores correspondentes às atitudes da plataforma SISVANT de baixo custo (k, φ, ω), em decorrência da imprecisão da integração INS/GNSS (Figura 3.16).

Para o alinhamento procurou-se, também, à similaridade entre todas as fotografias processadas. A técnica que o software utiliza consiste em estabelecer uma relação geométrica entre duas vistas similares, quando cada cena possui o seu centro de projeção e estes não são coincidentes. Cada par de imagens capturado representa duas perspectivas diferentes de uma mesma cena estática. Esta técnica, também conhecida como geometria epipolar, foi empregada na busca por pontos correspondentes através de algoritmos (SANTOS, 2012).

Esta etapa exigiu um microcomputador com grande capacidade de processamento de dados devido à quantidade e qualidade das fotografias adquiridas, bem como dos algoritmos de processamento digital. Para tanto, verificou-se através de testes de processamento em blocos, que a estrutura mínima para processar um bloco fotogramétrico com 329 fotografias deve conter, ao menos, um processador Intel Core i-7 de 3,5 GHz, memória RAM de 16 Gb, uma placa de vídeo NVIDIA Ge-Force GTX 780 Ti e um disco rígido de 1 Tb de armazenamento, ou similar. A Figura 3.17 e Figura 3.18 ilustram o processo de alinhamento das fotografias selecionadas e os pontos homólogos encontrados.

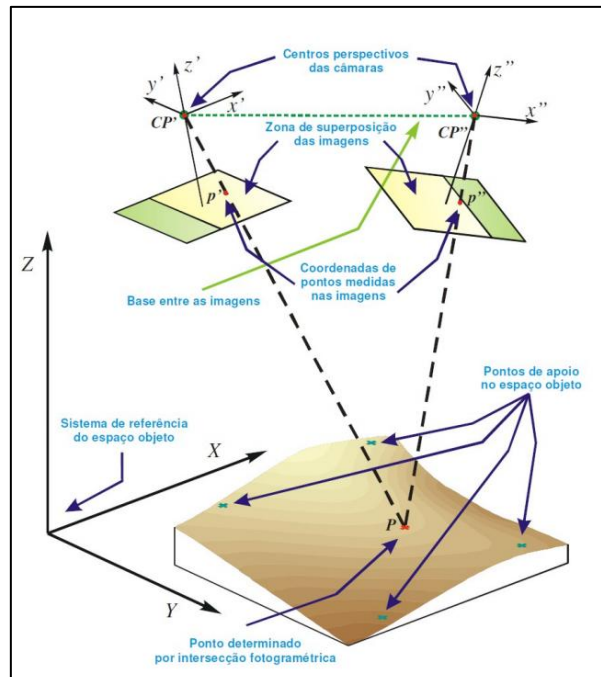


FIGURA 3.16 - PROCESSO DE RECONSTRUÇÃO 3D A PARTIR DE AEROFOTOGAMETRIA.
FONTE: O autor (2014).

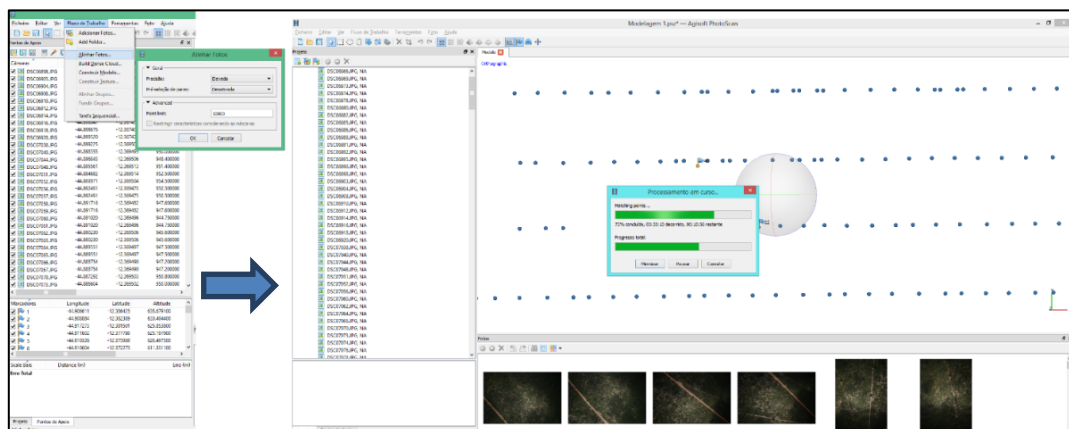


FIGURA 3.17 - ALGORITMO PARA ALINHAMENTO DAS FOTOGRAFIAS SENDO PROCESSADO.
FONTE: O autor (2014).

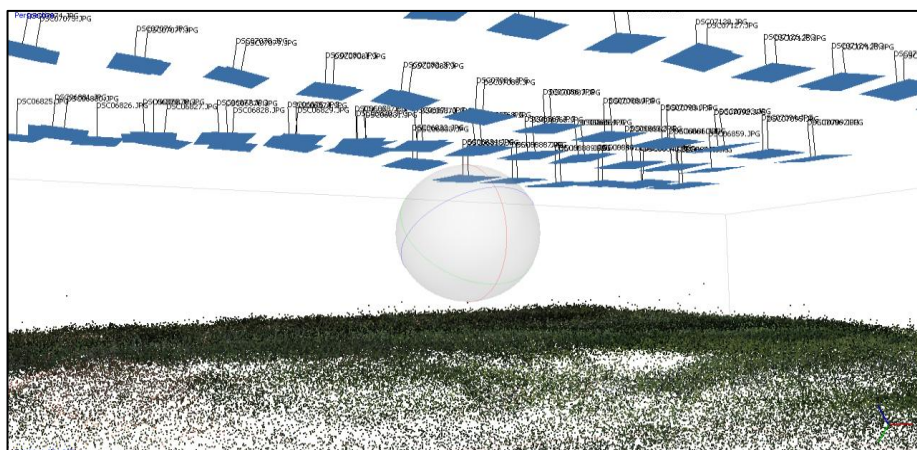


FIGURA 3.18 - PONTOS HOMÓLOGOS ENTRE AS FOTOGRAFIAS AÉREAS.
FONTE: O autor (2014).

Na sequência foi realizada a aerotriangulação através do método dos feixes perspectivos (*bundle block adjustment*), permitindo que todas as imagens que compõem o espaço imagem e todos os pontos fotogramétricos contidos nestas imagens fossem processados em um único processo (Figura 3.19).

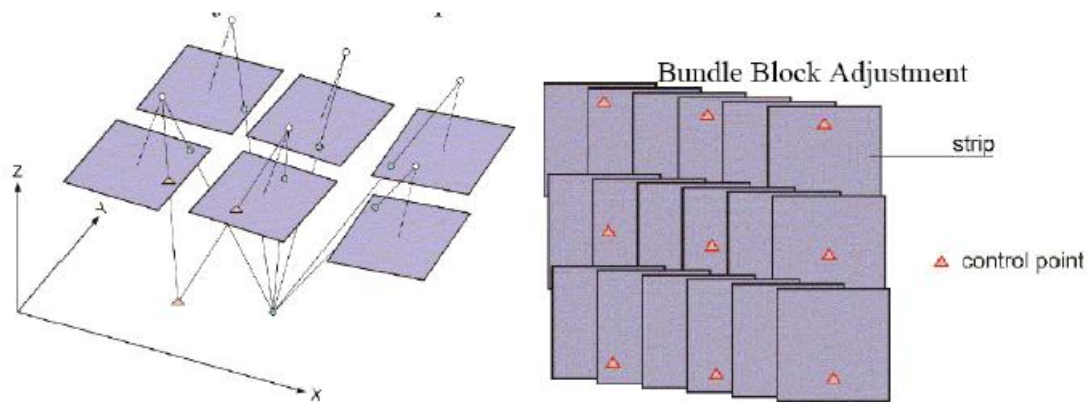


FIGURA 3.19 - MÉTODO DO AJUSTAMENTO POR FEIXES PERSPECTIVOS.
FONTE: Gonçalves, 2008.

De forma geral, este método utiliza o modelo de colinearidade para relacionar o espaço-imagem com o espaço-objeto por meio de alguns pontos de apoio conhecidos no objeto e medidos nas imagens, e muitos outros de ligação medidos apenas nas imagens, ou seja, a geometria de um par de fotografias, com sobreposição adequada, permitiu a formação de um modelo estereoscópico, por interseção de raios homólogos.

Em outras palavras, a equação da colinearidade relacionou os parâmetros de orientação exterior, as coordenadas fotográficas de um ponto e as coordenadas tridimensionais do mesmo ponto. Assim, sabendo-se qualquer um deles, foi possível obter os outros através de um ajustamento por mínimos quadrados (BRITO; COELHO, 2002).

Dessa forma, o centro perspectivo da câmera (O), um ponto no sistema fotogramétrico (p) e esse ponto no espaço-imagem (P) são ditos colineares, ou seja, há uma reta comum que liga esses três pontos, conforme ilustra a FIGURA 3.20.

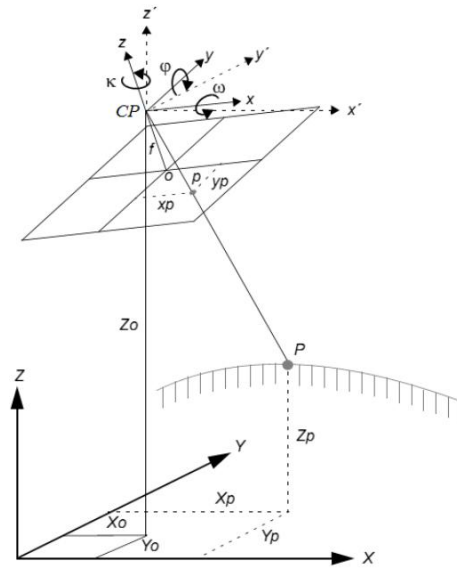


FIGURA 3.20 - ESPAÇO-IMAGEM E ESPAÇO-OBJETO, CONDIÇÃO DE COLINEARIDADE E ELEMENTOS DE ORIENTAÇÃO EXTERIOR.

FONTE: Palermo; Leite, 2013.

Portanto, cada par de fotografias foi representado pelo par de equações (3.12) e (3.13) a seguir:

$$x_p = -f \cdot \frac{m_{11}(X - X_{cp}) + m_{12}(Y - Y_{cp}) + m_{13}(Z - Z_{cp})}{m_{31}(X - X_L) + m_{32}(Y - Y_L) + m_{33}(Z - Z_L)} \quad (3.12)$$

$$y_p = -f \cdot \frac{m_{11}(X - X_{cp}) + m_{12}(Y - Y_{cp}) + m_{13}(Z - Z_{cp})}{m_{31}(X - X_{cp}) + m_{32}(Y - Y_{cp}) + m_{33}(Z - Z_L)} \quad (3.13)$$

Onde:

- f = distância focal da câmera = 16 mm;
- x_p, y_p = coordenadas do ponto “p” medidas no sistema fotogramétrico (espaço-imagem), ou seja, são as fotocoordenadas;
- X, Y, Z = coordenadas tridimensionais de terreno do ponto P, medidas no espaço-objeto;
- X_{cp}, Y_{cp}, Z_{cp} = coordenadas do centro perspectivo (O), medidas no espaço-objeto;
- m_{11} a m_{33} = elementos da matriz de rotação, formados pelos ângulos de Euler.

Na sequência, com a nuvem de pontos determinada pela aerotriangulação, foi estabelecida uma grade triangular irregular (TIN - *Triangulated Irregular Network*). Este método de estruturação dos dados cria uma superfície a partir de pontos espaçados irregularmente.

Os triângulos que formaram a TIN adequaram-se à densidade de pontos detectados no processamento anterior. Quanto maior a irregularidade do relevo, maior a densidade de pontos e, conseqüentemente, maior a densidade de triângulos da grade.

De acordo com Felgueiras (2001), o modelo da grade irregular TIN é mais propício para a inclusão das feições topográficas estruturais, ou seja, representa melhor superfícies não homogêneas com variações locais acentuadas, pois apresenta uma estrutura de dados mais complexa, onde os vértices dos triângulos pertencem ao próprio conjunto amostral. Cada vértice da rede é procedente da altitude advinda da equação de colinearidade.

De maneira análoga, Felgueiras (2001) afirma que, dado um conjunto de amostras com cardinalidade maior do que 4, pode-se construir mais de uma malha triangular sobre esse conjuntos, refinando-os.

Utilizou-se a triangulação de Delaunay, o qual maximiza os ângulos mínimos de cada triângulo da grade. Isto é equivalente a dizer que, a malha final deve conter triângulos o mais próximo de equiláteros possível, evitando-se a criação de triângulos afinados, ou seja, com ângulos internos muito agudos (FELGUEIRAS, 2001). A ferramenta computacional utilizada considera o método de implantação da triangulação de Delaunay através de um algoritmo de passo único, com restrições, levando em conta primeiramente as características topográficas da superfície e depois o critério do circuncírculo de Delaunay. Este critério diz que o círculo que passa pelos três vértices de cada triângulo da malha triangular não contém, no seu interior, nenhum ponto do conjunto das amostras além dos vértices do triângulo em questão. Este procedimento, na rotina computacional, é caracterizada como a opção de criação de “mapa de altura/terreno”, otimizado para a modelagem de superfícies planas através de fotografias aéreas. Cria-se, então uma nuvem de pontos com uma grade de 200.000 triângulos obtidos por interpolação.

A Figura 3.21 e a Figura 3.22 ilustram, respectivamente, a aplicação do algoritmo dentro da rotina computacional para geração do MDE.

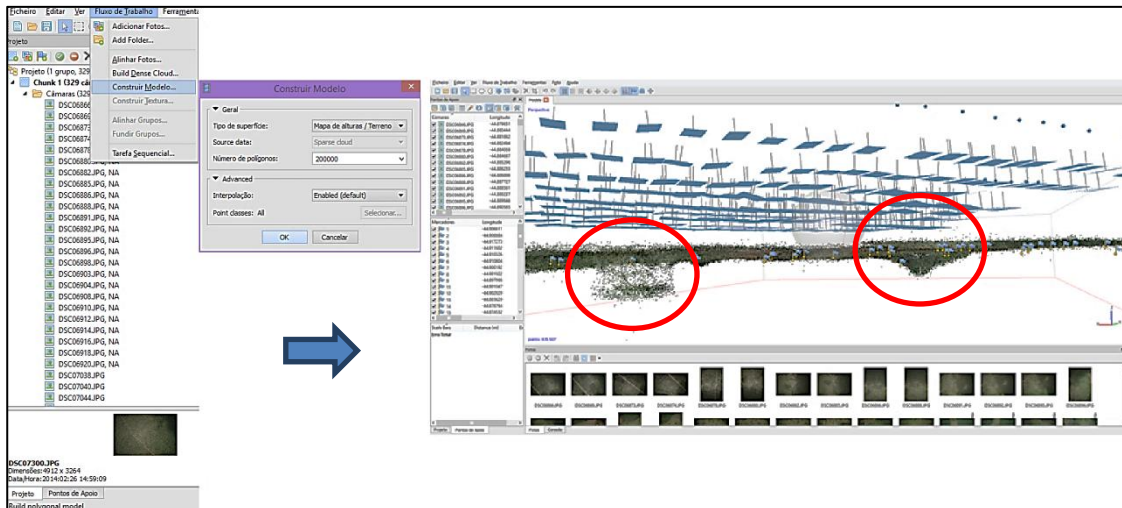


FIGURA 3.21 - CONSTRUÇÃO DO MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO. EM DESTAQUE: CAVERNAS DO SISTEMA CÁRSTICO DO RIO JOÃO RODRIGUES.

FONTE: O autor (2014).

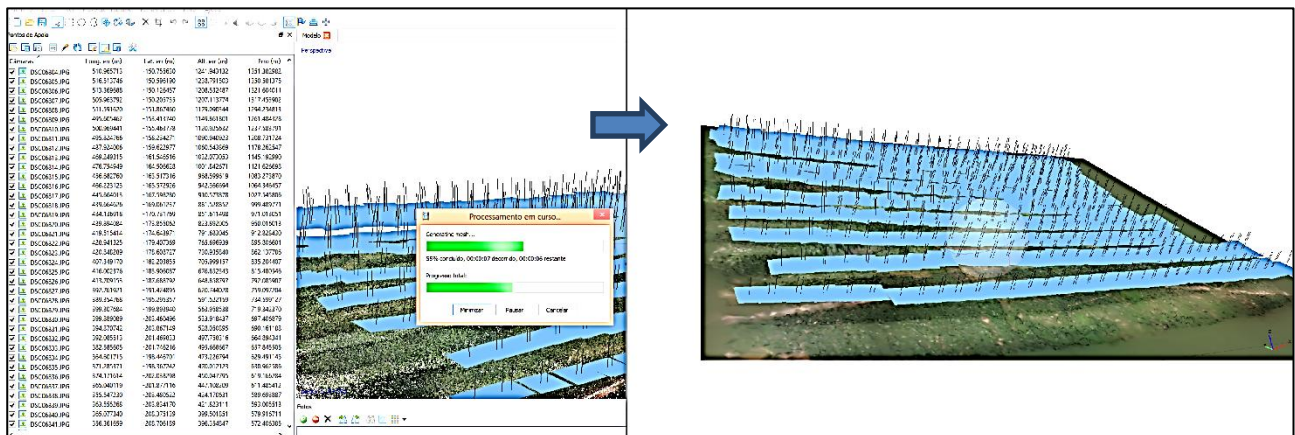


FIGURA 3.22 - MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO GERADO.

FONTE: O autor (2014).

Em geral, a visualização do modelo projetado num plano, com inclusão de textura, é realizada através de técnicas de projeção planar conhecidas como “*ray tracing*”. Esta técnica baseia-se no acompanhamento do traçado do raio desde o centro de projeção até ele alcançar elementos da superfície a ser projetada.

Ao término desta etapa, o MDE já se encontra integrado com as fotografias aéreas no processo de projeção perspectiva planar, ou seja, utiliza-se a técnica de “*ray tracing*” com textura externa. Neste processo o modelo é responsável pela definição da geometria da superfície projetada enquanto que a imagem é usada como dado de textura (FELGUEIRAS, 2001). A rotina computacional menciona o processa como “texturização”, uma vez que se define na ortofoto a posição do pixel a ser preenchido com o valor de brilho associado ao pixel da fotografia original (REISS, 2012).

Na sequência, definiu-se o modo de combinação da textura com o MDE para se gerar a ortofoto. O algoritmo utilizado foi o “Mosaico”, uma vez que é o modo pelo qual o software gera as ortofotos com base nos dados do MDE (AGISOFT, 2013).

A próxima etapa remete-se à utilização do algoritmo “ortofoto”, que utiliza o processo direto para se efetuar a transformação de uma foto original, que é uma perspectiva central do terreno, em uma projeção ortogonal sobre um plano da projeção ortogonal.

Resumidamente, o processo de ortorretificação consistiu nos seguintes passos: obtenção da posição XYZ de um ponto, utilizando o MDE; o cálculo da posição correspondente a este ponto na fotografia por meio das equações de colinearidade; a interpolação para obter o valor do pixel a ser levado para a ortofoto; e a transferência do valor do pixel interpolado para a posição correspondente à posição (X,Y) na ortofoto (MARTINS, 2010).

Para exportar a ortofoto definiu-se, primeiramente, o Sistema de Coordenadas (WGS 84). Na sequência, atribuiu o tamanho do pixel (GSD) como 8,9 cm, conforme calculado anteriormente, pois a amostragem do produto final não pode ser maior que a dos dados originais (LIMA *et al.*, 2004), e exportou-se em formato TIFF (*.tif) (Figura 3.23).

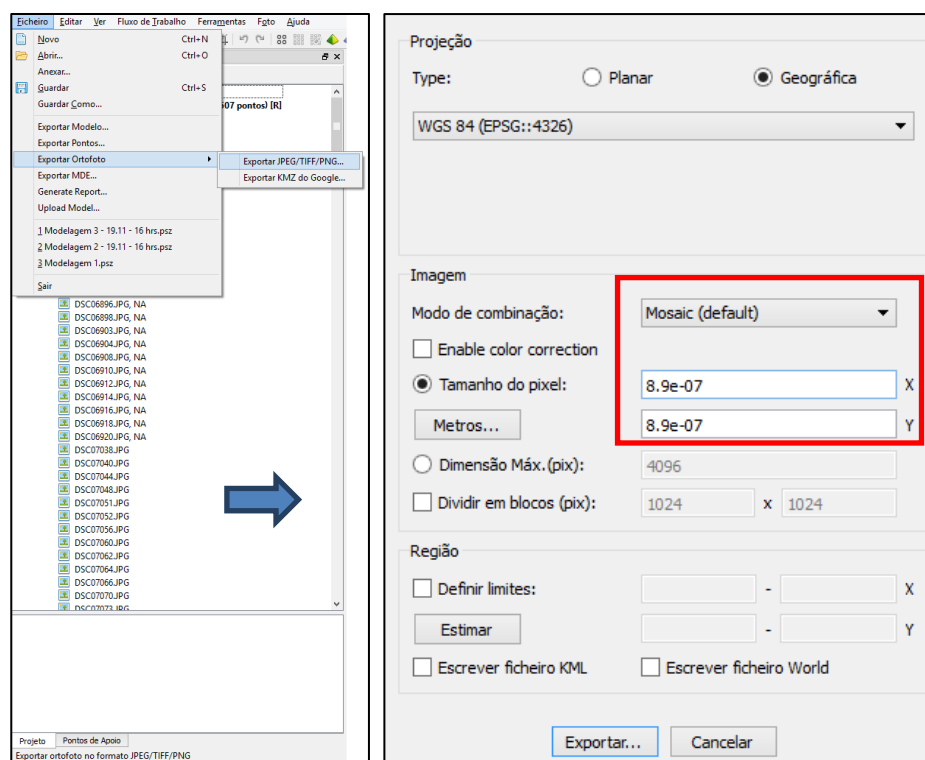


FIGURA 3.23 - EXPORTAR A ORTOFOTO PARA O FORMATO DESEJADO.
FONTE: O autor (2014).

3.3.6.2 Experimento 02: utilizando os pontos de apoio obtidos via rastreo GNSS no processamento

Com a pré-identificação dos alvos, realizou-se o imageamento aéreo a fim de se identificar a marcação artificial no terreno através das fotografias. Logo em seguida, realizou-se o rastreo terrestre visando à obtenção de coordenadas geodésicas planimétricas e altimétricas dos pontos de controle. Adotou-se, portanto, pontos de apoio bem distribuídos na região periférica (bordas) e no centro do bloco.

Optou-se em estabelecer três configurações de processamento utilizando os pontos de apoio e o controle da qualidade através dos pontos de verificação, a saber:

- 12 pontos de apoio e 15 pontos de verificação;
- 20 pontos de apoio e 07 pontos de verificação; e
- 07 pontos de apoio e 07 pontos de verificação.

Após o processamento destes pontos de apoio, eles foram adicionados como marcadores (*makers*) no Agisoft PhotoScan. A Figura 3.24 apresenta os marcadores inseridos no software, ilustrado com um quadrado vermelho, a fim de serem processados juntamente com as fotografias aéreas.

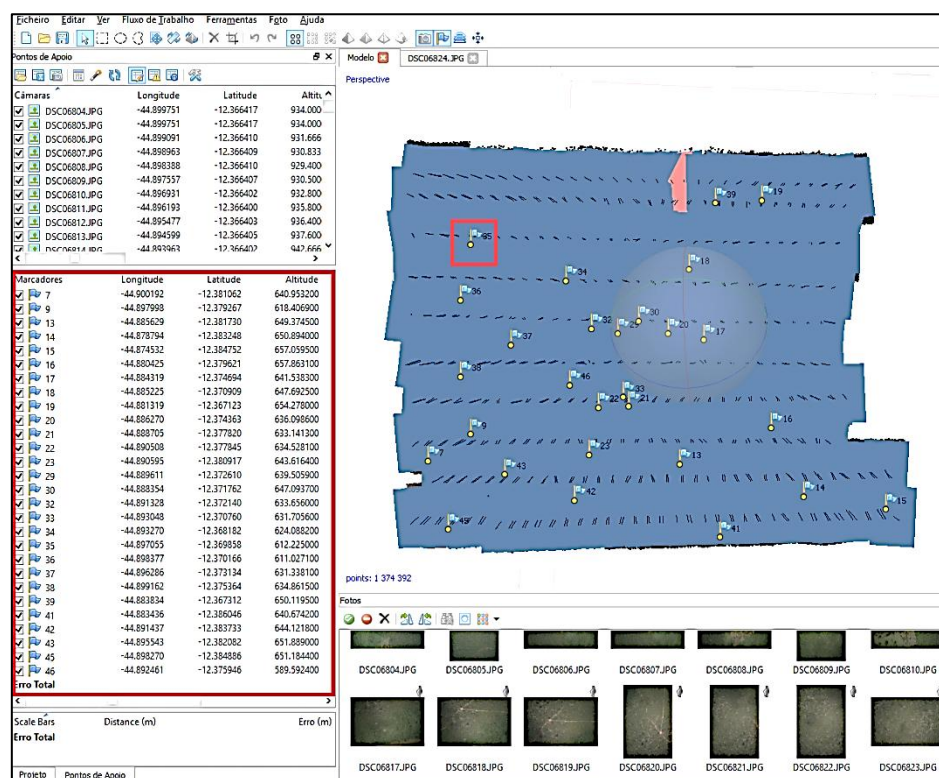


FIGURA 3.24 - PONTOS DE APOIO ADICIONADOS COMO MARCADORES NO AGISOT PHOTOSCAN. FONTE: O autor (2014).

Os marcadores são utilizados para a inserção das coordenadas obtidas através do rastreo terrestre e a respectiva projeção de sua localização nas fotografias, através dos pontos pré-identificados. Este processo é realizado automaticamente pelo Agisoft PhotoScan, porém a sua localização na fotografia foi aperfeiçoada manualmente, movendo-se os marcadores para os pontos pré-identificados (cal e lona amarela).

A inserção da correta posição do marcador se faz através de sua identificação, em, pelo menos, duas fotografias. A Figura 3.25 ilustra um exemplo do processo manual da correta identificação da coordenada geodésica obtida via rastreo GNSS com a sua localização pré-sinalizada na fotografia aérea.

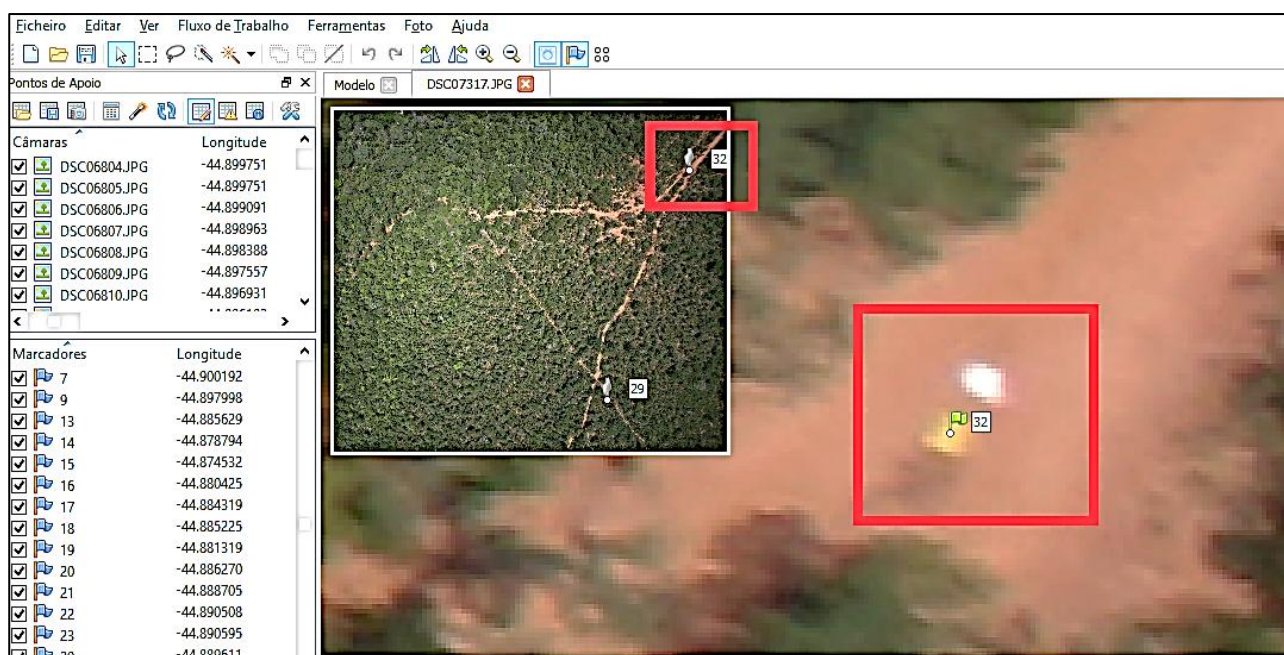


FIGURA 3.25 - EXEMPLO DO PROCESSO MANUAL DA CORRETA IDENTIFICAÇÃO DA COORDENADA OBTIDA VIA RASTREIO TERRESTRE COM A PRÉ-SINALIZAÇÃO.

FONTE: O autor (2014).

Após este processo manual de identificação dos pontos de apoio nas fotografias, efetuou-se o alinhamento para nova identificação dos pontos homólogos entre elas.

A sequência metodológica com a utilização dos pontos de apoio seguiu de maneira análoga à sem os pontos de apoio, ou seja, aerotriangulação, geração do MDE e ortofoto, acrescida a etapa supracitada de identificação dos marcadores.

3.3.7 Métodos empregados na avaliação da exatidão posicional

O Decreto-Lei nº 89.817 define, em seu artigo 8º, que o Padrão de Exatidão Cartográfica é um indicador estatístico de dispersão, relativo a 90% de probabilidade, que define a exatidão de trabalhos cartográficos.

Portanto, após o processamento utilizando os pontos de apoio, considerou os pontos de verificação de cada configuração, assumindo que suas coordenadas são isentas de erros.

Na aplicação do PEC, utilizaram-se pontos de verificação bem distribuídos na imagem e seus respectivos homólogos nos produtos obtidos. De posse das coordenadas pôde-se avaliar as discrepâncias $(\Delta x_i, \Delta y_i, \Delta p)$ e calcular as estatísticas das amostras, como a média $(\overline{\Delta x}, \overline{\Delta y})$ e o desvio padrão da direção $(S_{\Delta x}, S_{\Delta y})$ e o desvio padrão da posição (S_p) . As equações (3.14) a (3.19) explicitam as relações supramencionadas.

$$(\Delta x_i, \Delta y_i) = (x_{ci} - x_n, y_{ci} - y_n) \quad (3.14)$$

$$\Delta p = \sqrt{\Delta x_i^2 + \Delta y_i^2} \quad (3.15)$$

$$\overline{\Delta x} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta x_i}{n} \quad (3.16)$$

$$\overline{\Delta y} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta y_i}{n} \quad (3.17)$$

$$S_{\Delta y} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta y_i - \overline{\Delta y})^2}{n-1}} \quad (3.18)$$

$$S_{\Delta x} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta x_i - \overline{\Delta x})^2}{n-1}} \quad (3.19)$$

Onde:

- $(\Delta x_i, \Delta y_i)$ = discrepâncias entre as coordenadas;
- Δp = discrepâncias planimétricas;
- x_{ci}, y_{ci} = coordenadas retiradas da ortofotocarta;

- x_n, y_n = coordenadas de teste, obtidas em levantamento de maior precisão;
- $\overline{\Delta x}, \overline{\Delta y}$ = média das discrepâncias entre as coordenadas;
- $S_{\Delta x}, S_{\Delta y}$ = desvio padrão das discrepâncias entre as coordenadas.

3.3.8 Análise estatística no controle de qualidade das ortofotos

De posse das estatísticas amostrais foram realizados testes para avaliação de tendência e precisão. Segundo Galo *et al.* (2001), a análise estatística da acurácia planimétrica é composta pela análise de tendências e de precisão.

De acordo com Monico *et al.* (2009), Mikhail e Ackerman (1976) apresentaram a diferença entre precisão e acurácia, advindo da presença de erros sistemáticos, que se manifestam como uma tendência constante ou variável com tempo. Acrescentam, ainda, que na precisão se consideram apenas efeitos aleatórios, enquanto a acurácia inclui não só os efeitos aleatórios, mas também os sistemáticos.

3.3.8.1 Análise de tendência

O teste de tendência foi aplicado usando a hipótese nula, ou seja, se as discrepâncias médias amostrais forem estatisticamente iguais a zero (não significativos), dentro de certo nível de significância $(1-\alpha)$, admite-se a não existência de tendência.

A análise de tendência permitiu avaliar a acurácia das ortofotos. Esta análise é baseada na distribuição “t de Student”, a certo nível de confiança $(1-\alpha)$ e com grau de liberdade $(n-1)$, onde n corresponde ao número de amostras coletadas (ARIZA, 2002). A distribuição “t de Student” é particularmente válida para amostras consideradas pequenas $(n < 30)$.

Os valores de (t_x, t_y) são calculados a partir das equações (3.20) e (3.21):

$$|t_x| = \frac{\overline{\Delta x} \cdot \sqrt{n}}{S_x} \quad (3.20)$$

$$|t_y| = \frac{\overline{\Delta y} \cdot \sqrt{n}}{S_y} \quad (3.21)$$

As ortofotos estavam livres de erros sistemáticos nas coordenadas (x, y) se os valores de (t_x, t_y) calculados fossem inferiores ao valor limite $t_{(n-1, \alpha/2)}$ tabelado (Anexo II), conforme a condição expressa nas equações (3.22) e (3.23).

$$|t_x| < t_{(n-1, \alpha/2)} \quad (3.22)$$

$$|t_y| < t_{(n-1, \alpha/2)} \quad (3.23)$$

Dessa forma, a carta atendeu as condições de exatidão. Caso contrário, houve tendência em alguma direção significa.

3.3.8.2 Análise de exatidão

A utilização da distribuição Qui-quadrado para verificação da exatidão, proposta por Merchant (1982), é eficiente somente quando implementada associada à análise de tendência, pois não permite o enquadramento requisitado nos casos onde a tendência é identificada e não removida.

Para a análise de exatidão utilizou-se o teste Qui-quadrado (χ^2), onde se comparou a variância das discrepâncias amostrais com os valores pré-estabelecidos do Erro Padrão (EP), definido pelo Decreto nº 89.817/84, com o objetivo de verificar a classe que o produto analisado se enquadrava.

O teste de exatidão foi aplicado usando a hipótese nula, ou seja, se a variância da discrepância amostral do erro de posição do ponto (S_p^2) for estatisticamente igual a variância obtida a partir do Erro Padrão (σ_p^2), dentro de um certo nível de significância (α), admitiu-se que houve exatidão posicional.

A precisão no produto analisado foi atendida quando o valor calculado de $\chi_{p(n-1)}^2$ for inferior ao valor limite de $\chi_{(n-1, \alpha)}^2$. O valor de $\chi_{p(n-1)}^2$ foi calculado a partir da equação (3.23):

$$\chi_{p(n-1)}^2 = (n - 1) \cdot \left(\frac{S_p^2}{\sigma_p^2} \right) \quad (3.23)$$

Onde σ_p^2 varia em função da escala do produto, sendo calculado através da equação (3.24):

$$\sigma_p = \frac{EP}{\sqrt{2}} \quad (3.24)$$

Se for verificado que:

$$|\chi_X^2| < \chi^2_{(n-1, \alpha)} \quad (3.25)$$

A tomada de decisão foi realizada comparando-se os dois valores de χ^2 :

- Se χ^2 calculado $\geq \chi^2$ tabelado: Rejeitou-se H_0 .
- Se χ^2 calculado $< \chi^2$ tabelado: Aceitou-se H_0 .

Então a ortofoto, a qual o valor do Teste de Qui-quadrado calculado foi maior que o valor de Qui-quadrado tabelado (Anexo III), não atendeu a exigência para determinado padrão de precisão.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 PROCESSAMENTO DOS DADOS ATRAVÉS DO AGISOFT PHOTOSCAN

4.1.1 Parâmetros de Orientação Exterior

A etapa que antecedeu o processamento das imagens foi a seleção e filtragem das fotografias. A Figura 4.1 apresenta um exemplo de uma fotografia aérea inclinada que foi descartada do processamento e um esquema de uma aeronave indicando os ângulos de rotação ω , ϕ e κ , ao redor dos eixos X, Y e Z.

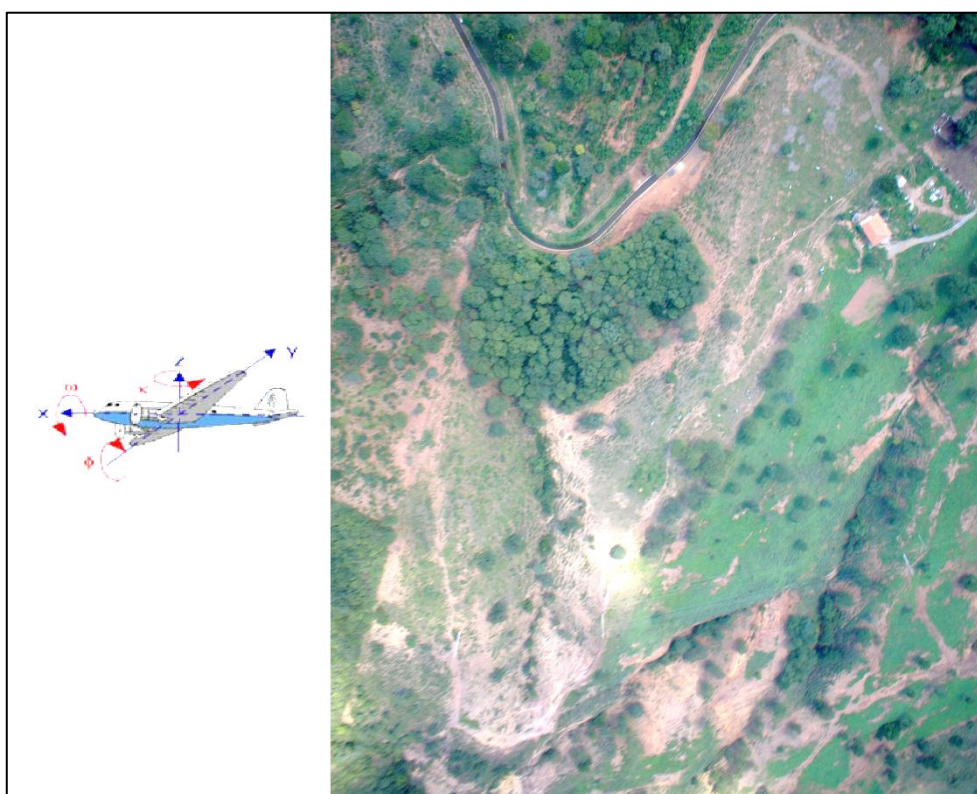


FIGURA 4.1 - EIXO DE ROTAÇÃO DO SISVANT E FOTOGRAFIA AÉREA INCLINADA.
FONTE: O autor (2014).

A falta de precisão na determinação da atitude da câmera a cada aerofoto tomada fez com que os mesmos não fossem utilizados no processamento inicial. Dessa forma, exigiu-se um processo de fototriangulação, realizado pelo software (ANDRADE, 2003).

Através de um tratamento estatístico, obteve-se as médias, os desvios padrão e os limites superiores e inferiores dos ângulos Roll (ω ou ω – *rolamento*), Pitch (ϕ ou

φ – inclinação) e Yaw (kappa ou k – direção) para o processamento com e sem pontos de apoio (Quadro 4.1).

Tratamento Estatístico	Atitudes Estimadas do Sensor Sem GCP			Atitudes Estimadas do Sensor Com GCP		
	Yaw est. (Z ou k)	Pitch est. (Y ou φ)	Roll est. (X ou ω)	Yaw est. (Z ou k)	Pitch est. (Y ou φ)	Roll est. (X ou ω)
Média:	183,2289	0,256129	0,194312	182,7832	-0,08946	0,837346
	183°13'44"	0°15'22,06"	0°11'39,52"	182°46'59,5"	-0°05'22,06"	0°50'14,45"
Desvio Padrão:	89,49704	21,46838	16,6120	89,49354	4,158715	1,465514
	89°29'49,34"	21°28'6,17"	16°36'43,2"	89°29'36,74"	4°09'31,37"	1°27'55,85"
Limite Inferior: Limite Superior:	93,73187	-21,2123	-16,4177	93,28966	-4,248175	-0,628168
	93°43'54,73"	-21°12'46,8"	-16°25'3,72"	93°17'22,78"	-4°14'53,43"	-0°37'41,4"
	272,7259	21,72451	16,80631	272,27674	4,069255	2,30286
	272°43'33,2"	21°43'28,24"	16°48'22,72"	272°16'36,2"	4°04'9,32"	2°18'10,3"

QUADRO 4.1 - TRATAMENTO ESTATÍSTICO DOS VALORES ESTIMADOS DAS ATITUDES.

FONTE: O autor (2014).

Os ângulos obtidos através de processamento sem GCP extrapolaram o valor absoluto, indicando alguma anomalia no processo de ajustamento de tais parâmetros.

As fotografias tomadas formaram faixas de voo sinuosas e apresentaram ângulos de rotação maiores que os de aerolevantamentos tradicionais, onde os ângulos Pitch (φ) e Roll (ω) são inferiores a 1°.

Tal situação pode ser explicada por Ruy (2008), que afirma que o sistema de navegação inercial (INS) utiliza sensores (acelerômetros e giroscópios) para realizar medidas de acelerações e variações angulares e promover informações de navegação, sem interferências externas. Contudo, a qualidade das medidas providas pelos sensores inerciais é degradada ao longo do tempo, devido aos erros internos do INS. Dessa forma, pode-se concluir que os erros ocorridos nos ângulos em Roll, Pitch e Yaw constituem erros no alinhamento da plataforma, tornando-a instável.

4.1.2 Alinhamento das fotografias aéreas

Este processo resultou em um grande tempo de processamento, através da rotina computacional. Como resultado, obteve-se uma densa nuvem de 1.374.392 pontos homólogos (*tie points* – pontos de ligação) entre as fotografias (Figura 4.2), sem a utilização dos pontos de apoio.

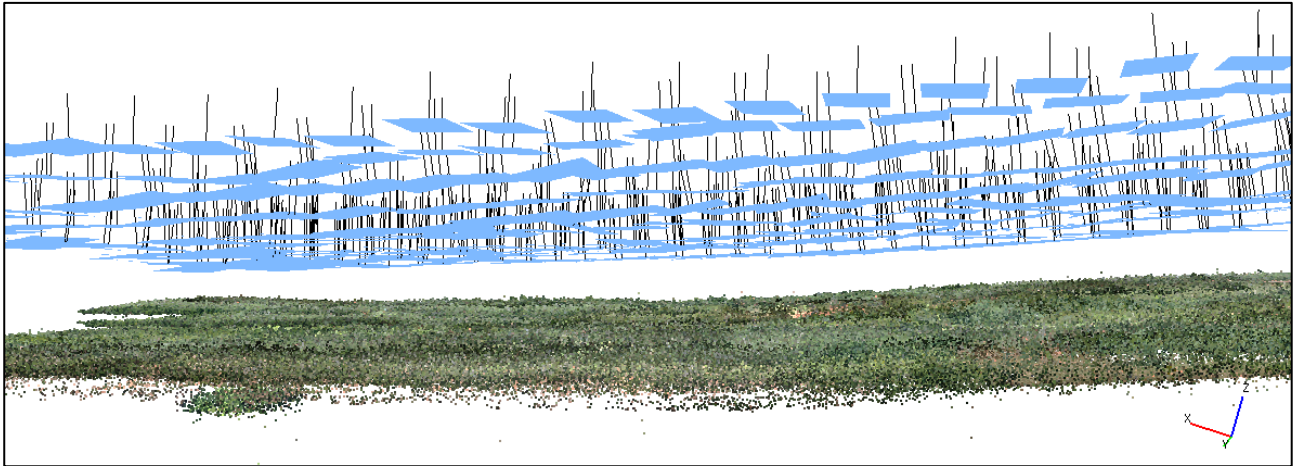


FIGURA 4.2 - PROCESSO DE ALINHAMENTO DAS FOTOGRAFIAS.
FONTE: O autor (2014).

O software estimou as atitudes da câmera no instante da tomada de cada fotografia e recalculou as coordenadas do CP das mesmas.

O processo manual de identificação dos pontos de controle no terreno com pontos de apoio pré-identificados nas fotografias possibilitou o processamento completo de todas as 600 fotografias, formando um bloco único com 2.717.245 pontos homólogos entre elas.

Ambos os processamentos obtiveram um alto índice de pontos homólogos entre as fotografias. Tal situação se justifica devido ao plano de voo ter sido estabelecido níveis de sobreposição lateral e longitudinal bem acima dos aplicados para aerofotogrametria convencional. Esta sobreposição se fez necessário em razão da instabilidade da plataforma no instante de tomada de cada fotografia.

4.1.3 Aerotriangulação e obtenção do Modelo Digital de Elevação

A fototriangulação, através de uma grade irregular TIN para o modelo sem pontos de apoio, gerou triângulos com 274.813 faces, distribuídas em 137.439 vértices (Figura 4.3).

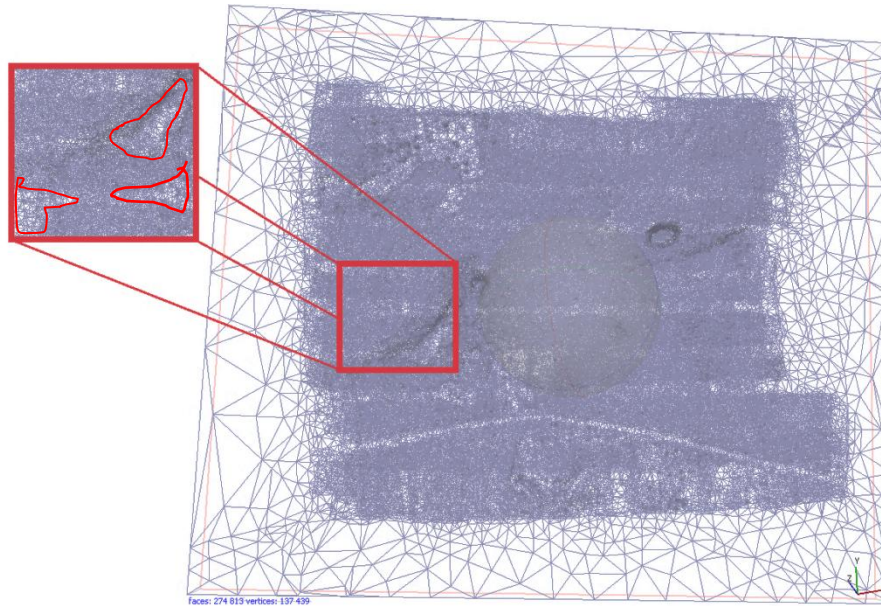


FIGURA 4.3 - GRADE TIN SEM PONTOS DE APOIO. DETALHE PARA SISTEMA CÂRSTICO DO RIO JOÃO RODRIGUES COM MENOR DENSIFICAÇÃO DA NUVEM DE PONTOS.
FONTE: O autor (2014).

Através da nuvem de pontos obtida através dos pontos homólogos entre as fotografias e densificada pelo processo manual de identificação dos pontos de apoio, a aerotriangulação gerou 543.381 faces triangulares e 271.724 vértices.

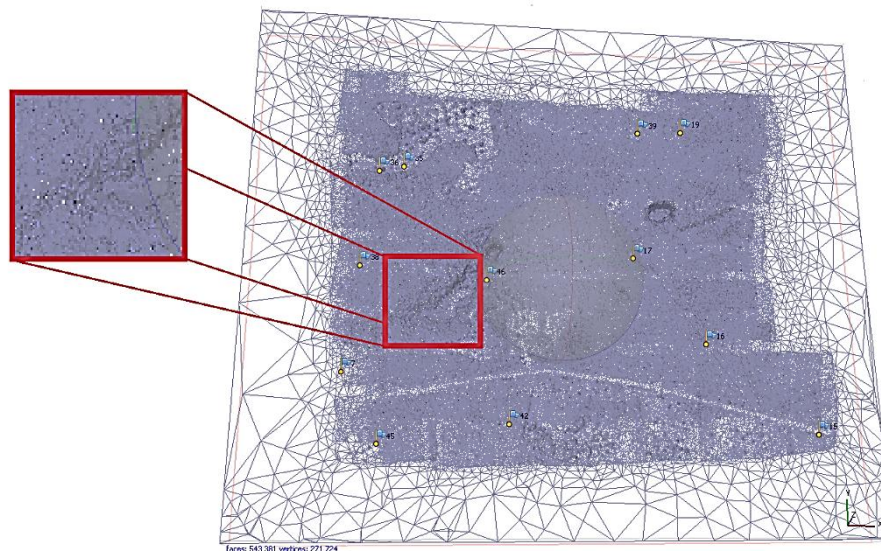


FIGURA 4.4 - GRADE TIN COM PONTOS DE APOIO. DETALHE PARA SISTEMA CÂRSTICO DO RIO JOÃO RODRIGUES COM MAIOR DENSIFICAÇÃO DA NUVEM DE PONTOS.
FONTE: O autor (2014).

Não foi utilizada a malha regular por ela não ser adequada para representar topografias e pela dificuldade em representar descontinuidades naturais (divisores de

água, canais, falhas geológicas e lagos) e artificiais (reservatórios, prédios e taludes de rodovias) do terreno (SANTOS *et al.*, 2008).

Com relação a fidedignidade da representação da área de estudo, caracterizada especialmente por cavidades subterrâneas, o algoritmo de geração do Modelo Digital de Elevação (MDE), através de uma TIN, se demonstrou viável para ambos os processamentos (com e sem pontos de apoio). As feições cársticas ficaram bem representadas, conforme ilustrado na Figura 4.5 e Figura 4.6.

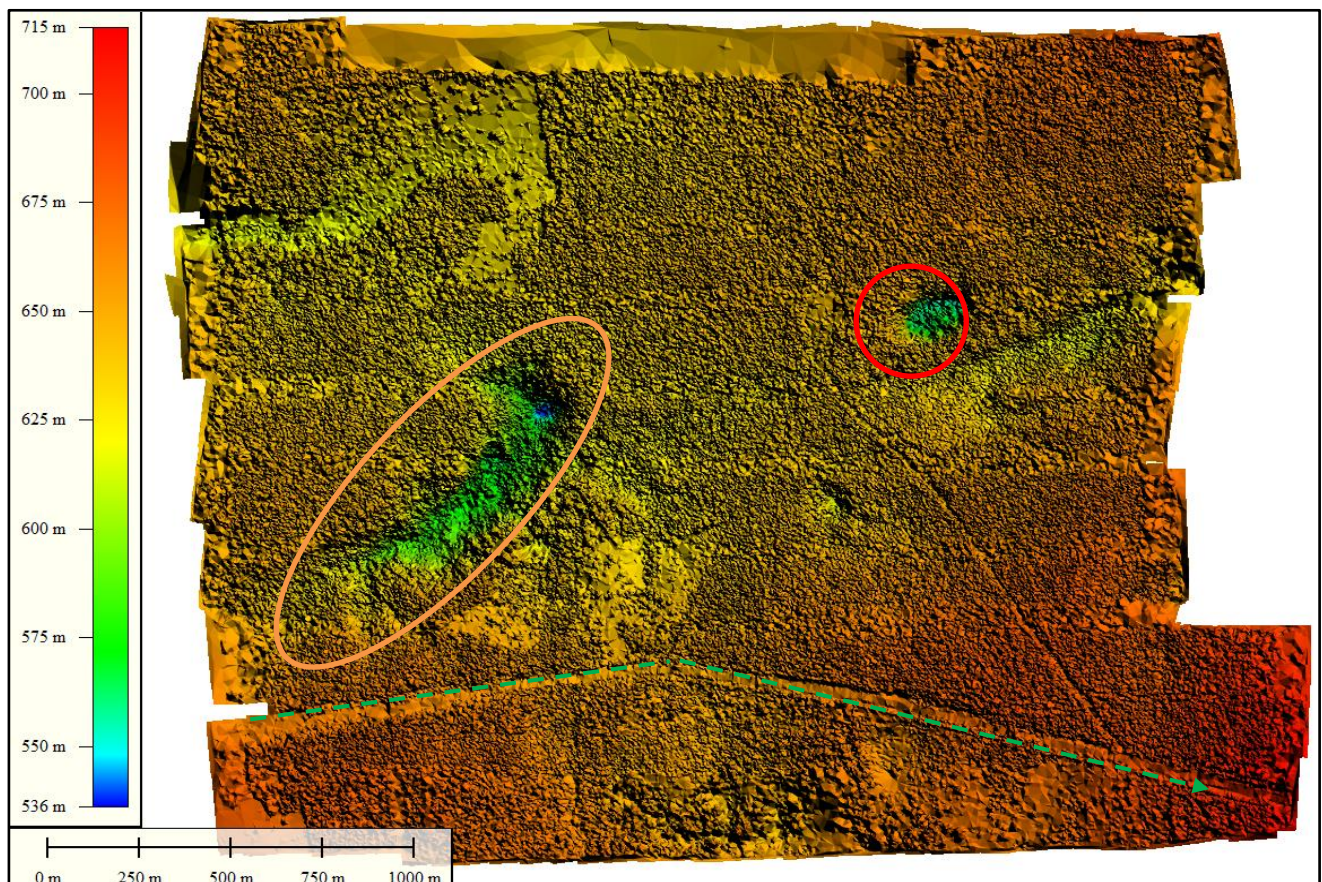


FIGURA 4.5 - VISTA EM PLANTA DA ÁREA DE ESTUDO.
FONTE: O autor (2014).



FIGURA 4.6 - PERFIL LONGITUDINAL DA ÁREA DE ESTUDO, REPRESENTADO PELAS FEIÇÕES CÂRSTICAS.
FONTE: O autor (2014).

A fim de se verificar a representação das cavidades, criou-se através do software de código fechado Global Mapper, dois perfis transversais representando as regiões de interesse, dentro da área de estudo. Para ambos (Figura 4.8 e Figura 4.7), pode-se comprovar que a modelagem representou fielmente as regiões de interesse para o mapeamento temático.

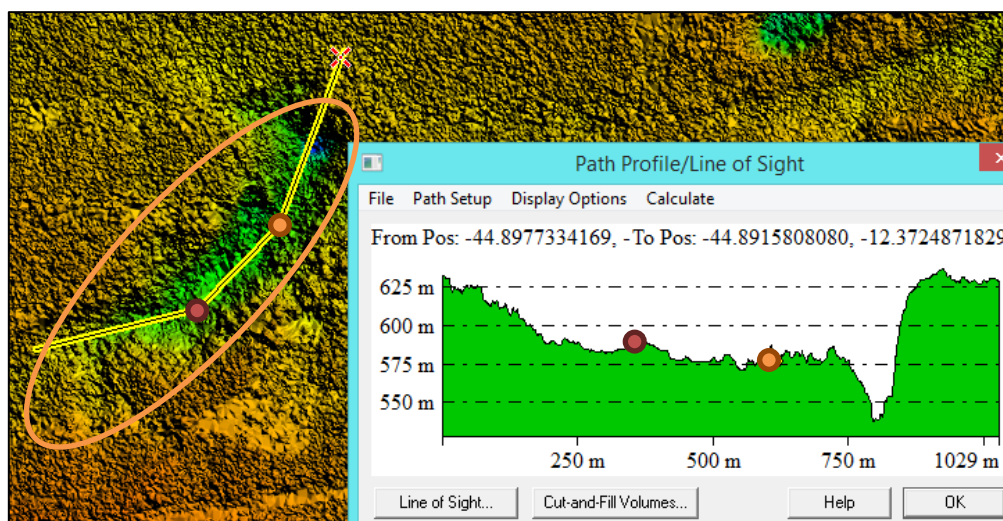


FIGURA 4.7 - PERFIL DA CAVIDADE SUBTERRÂNEA PRESENTE NA ÁREA DE ESTUDO.
FONTE: O autor (2014).

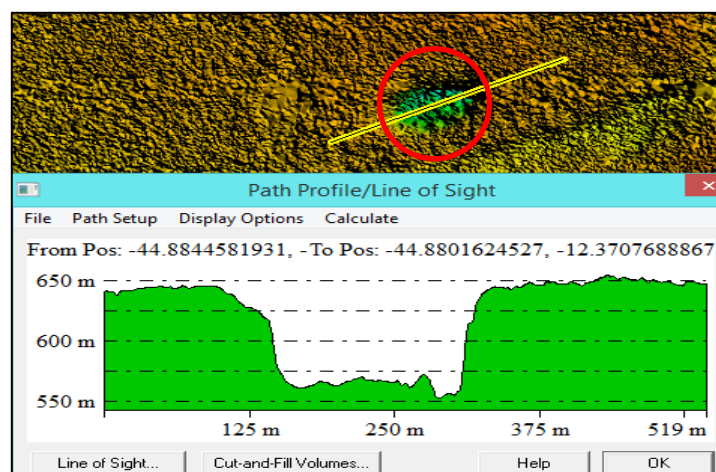


FIGURA 4.8 - PERFIL DO DOLINAMENTO PRESENTE NA ÁREA DE ESTUDO.
FONTE: O autor (2014).

A Figura 4.9 e a Figura 4.10 foram vetorizadas manualmente através do AutoCAD Civil 3D, onde foi possível identificar a hidrografia cárstica e a geologia local, servindo de base atualizada para a representação das feições naturais da área de estudo.

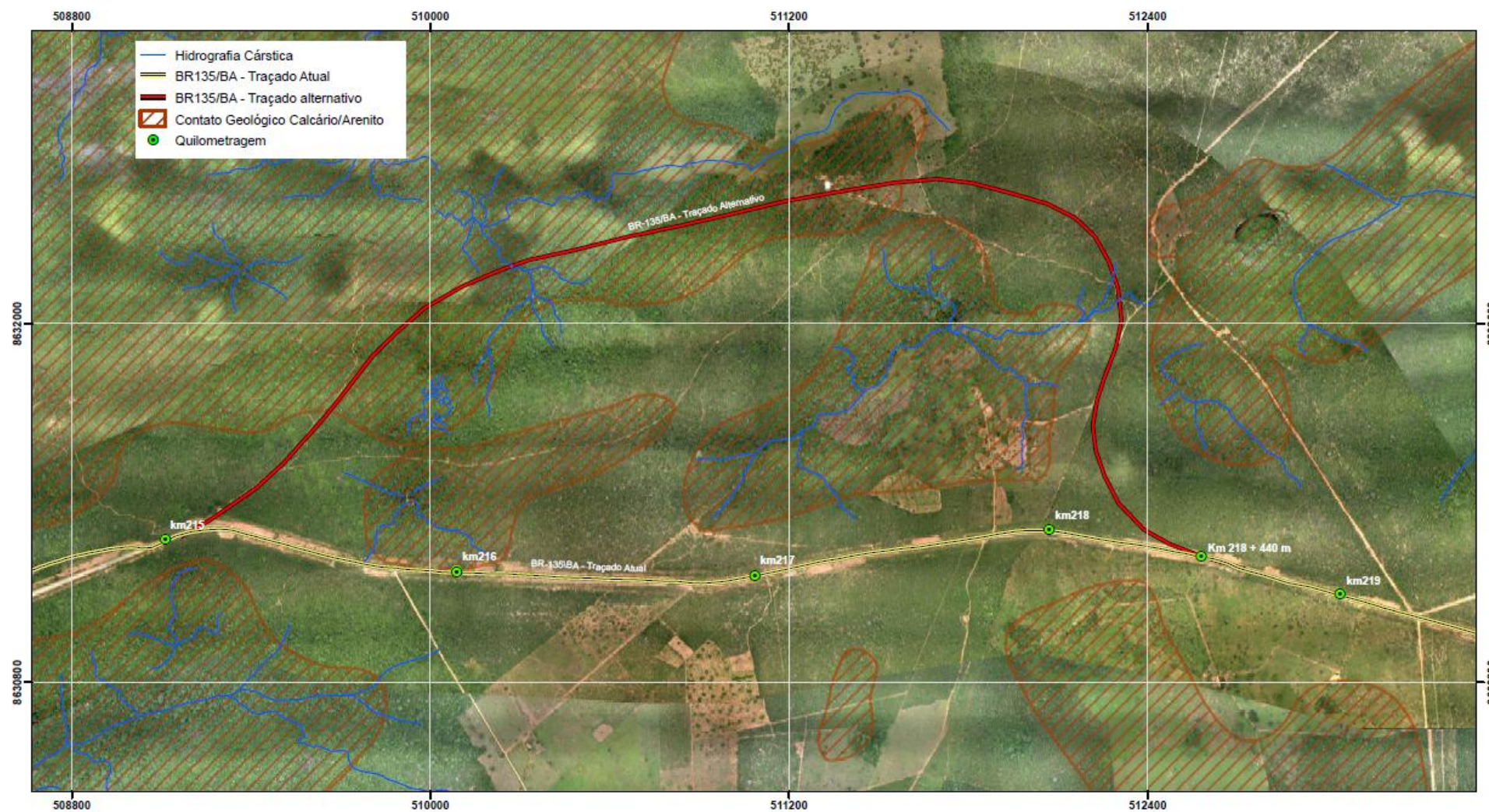


FIGURA 4.9 - IDENTIFICAÇÃO DA HIDROGRAFIA CÁRSTICA POSSIBILITADA PELA REALIZAÇÃO DO IMAGEAMENTO AÉREO.
FONTE: O autor (2014).

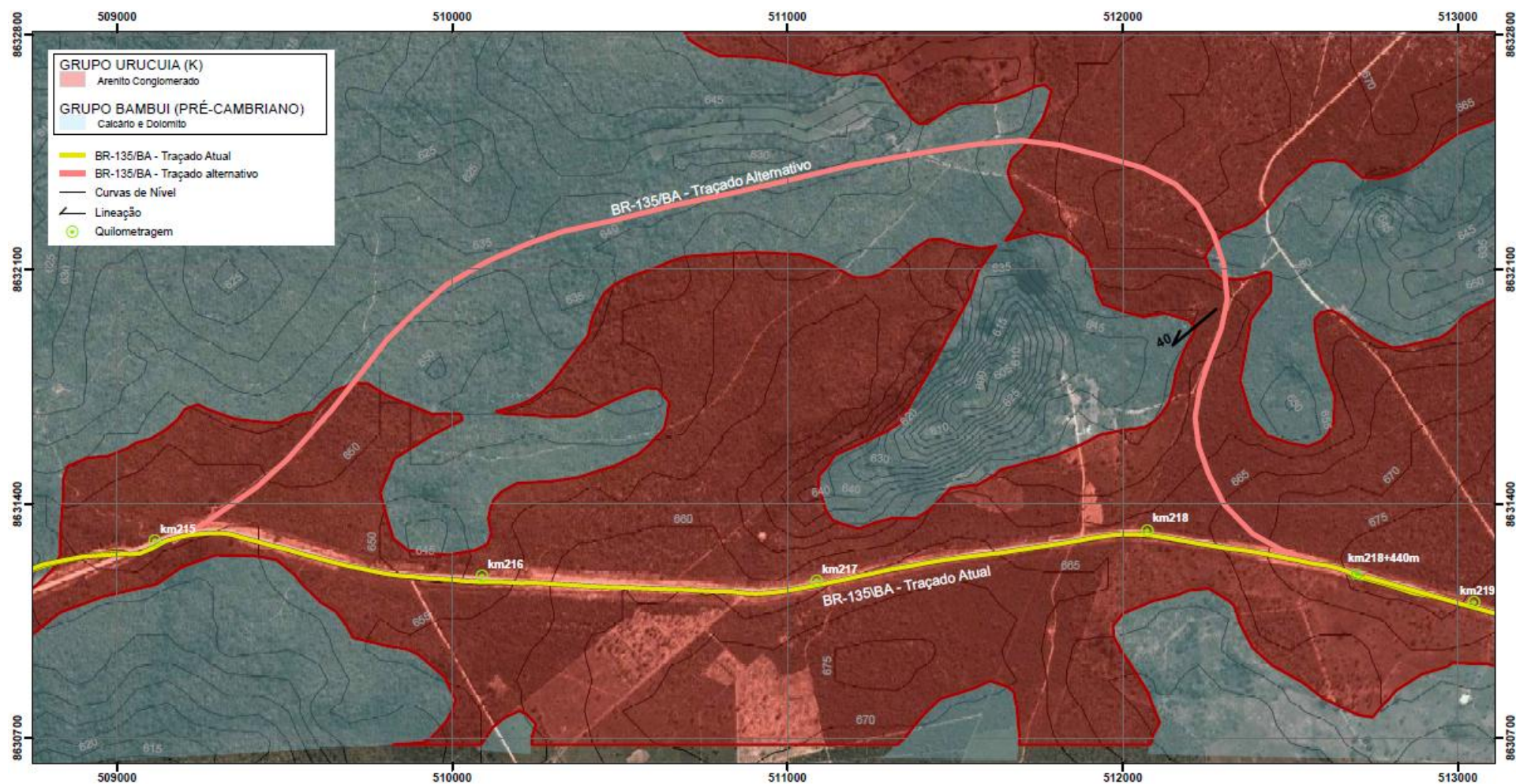


FIGURA 4.10 - ATUALIZAÇÃO DA GEOLOGIA LOCAL PROPICIADA ATRAVÉS DO IMAGEAMENTO VANT REALIZADO NA ÁREA DE ESTUDO.
FONTE: O autor (2014).

4.1.4 Geração das ortofotos

As etapas anteriores permitiram o conhecimento da posição e atitude de cada fotografia aérea, bem como do modelo digital de elevação, no sistema cartográfico requerido.

O primeiro experimento considerou uma configuração da ortofoto processada sem os pontos de apoio, visando verificar a verdadeira potencialidade de um SISVANT de baixo custo e a obtenção de produtos cartográficos. Tal situação se fez necessária devido ao significativo aumento no desenvolvimento e comercialização de plataformas VANT. Em seu processo de geração, foram obtidos 435.507 pontos de ligação entre as fotografias.

O segundo experimento considerou em seu processamento os pontos de apoio bem distribuídos no bloco. Para que a amostra não apresentasse tendenciosidade, efetuou-se uma escolha aleatória dos pontos de verificação. Nesta pesquisa optou-se pela identificação de pontos distribuídos nas regiões de maior concentração de informações visualmente disponíveis, evitando-se a escolha homogênea.

Ao se realizar o alinhamento entre as fotografias, foram encontrados 1.375.392 pontos homólogos entre elas, aproximadamente 3,15 vezes mais pontos homólogos que o processamento sem GCP.

A Figura 4.11 apresenta ambos processamentos (sem e com GCP) sobrepostos e uma indicação na região de maior discrepância horizontal, apresentando um deslocamento de 330 metros entre as ortofotos para o eixo “x” e 83 metros para o eixo “y”.

Além do processamento sem pontos de apoio realizado para o Experimento 01, foram realizados outros três processamentos para o Experimento 02, a saber

- 12 pontos de apoio e 15 pontos de verificação;
- 20 pontos de apoio e 07 pontos de verificação; e
- 07 pontos de apoio e 07 pontos de verificação.

Ao total foram processadas 04 configurações a fim de se obter um comparativo entre si quanto à qualidade final dos produtos gerados.



FIGURA 4.11 - DIFERENÇAS NO PROCESSAMENTO DAS ORTOFOTOCARTA GERADA PELO AGISOFT PHOTOSCAN, COM E SEM APOIO DE CAMPO.
FONTE: O autor (2014).

4.2 CONTROLE DE QUALIDADE DOS PRODUTOS OBTIDOS

4.2.1 Comparações entre as configurações

Para a primeira comparação entre produtos obtidos através do processamento das fotografias aéreas, utilizou as seguintes configurações:

1. **Configuração nº 01:** Processamento sem pontos de apoio e 15 pontos de verificação;
2. **Configuração nº 02:** Processamento com 12 pontos de apoio e 15 pontos de verificação;
3. **Configuração nº 03:** Processamento com 7 pontos de apoio e 7 pontos de verificação;

4. Configuração nº 04: Processamento com 20 pontos de apoio e 7 pontos de verificação.

4.2.1.1 1ª comparação: Configuração nº 01 e nº 02

Foram utilizados 12 pontos de apoio para o processamento (Quadro 4.2) e escolhidos 15 pontos planialtimétricos de verificação e controle da qualidade dos produtos (Quadro 4.3).

Coordenadas dos Pontos de Apoio (UTM)				
Pto	ID	E	N	Z
PA1	7	510849,507	8631306,645	640,953
PA2	15	513638,676	8630897,492	657,060
PA3	16	512998,331	8631465,135	657,863
PA4	17	512575,310	8632010,109	641,538
PA5	19	512901,798	8632847,235	654,278
PA6	35	511190,990	8632545,441	612,225
PA7	36	511047,303	8632511,464	611,027
PA8	38	510961,725	8631936,679	634,862
PA9	39	512628,404	8632826,407	650,120
PA10	42	511801,084	8631010,887	644,122
PA11	45	511058,329	8630883,744	651,184
PA12	46	511690,109	8631872,094	589,592

QUADRO 4.2 - COORDENADAS (EM METROS) DOS 12 PONTOS DE APOIO (UTM).

FONTE: O autor (2014).

Coordenadas dos Pontos de Verificação (UTM)				
Pto	ID	E	N	Z
PV1	9	511088,128	8631505,021	618,407
PV2	13	512432,571	8631232,185	649,375
PV3	14	513175,487	8631063,996	650,894
PV4	18	512476,947	8632428,697	647,693
PV5	20	512363,157	8632046,844	636,099
PV6	21	512098,312	8631664,634	633,141
PV7	22	511902,360	8631662,021	634,528
PV8	23	511892,740	8631322,312	643,616
PV9	29	512000,063	8632240,856	639,506
PV10	30	512136,788	8632334,526	647,094
PV11	32	511813,498	8632292,875	633,656
PV12	33	511626,517	8632445,572	631,706
PV13	34	511602,544	8632730,720	624,088
PV14	37	511274,408	8632183,212	631,338
PV15	43	511354,844	8631193,682	651,889

QUADRO 4.3 – COORDENADAS (EM METROS) DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO (UTM).

FONTE: O autor (2014).

O controle de qualidade foi realizado através de análises estatísticas de exatidão e tendência dos modelos, através das discrepâncias entre as coordenadas planialtimétricas de referência (reais) e as dos modelos, obtidas em amostra com 15 pontos de verificação localizados na área do levantamento (Quadro 4.4).

Pto	Processamento Sem GCP				Processamento Com 12 GCP		
	ID	E	N	Z	E	N	Z
PV1	9	511287,5085	8631470,0249	1453,7617	511093,9913	8631493,2800	630,7606
PV2	13	512522,4581	8631210,4103	919,7146	512428,5712	8631238,1083	658,4713
PV3	14	513201,6812	8631055,0947	625,2782	513163,5854	8631085,4557	675,3677
PV4	18	512700,2307	8632351,7848	1221,5319	512480,1123	8632421,4791	643,2840
PV5	20	512539,2835	8631993,9911	1149,1565	512359,4767	8632045,8520	632,1234
PV6	21	512247,9122	8631628,5144	1136,8047	512094,8566	8631663,3005	631,9416
PV7	22	512065,0300	8631625,1502	1208,1631	511900,1465	8631659,3778	633,3940
PV8	23	512025,1165	8631296,7471	1128,7710	511893,0674	8631322,3624	647,9111
PV9	29	512224,2162	8632184,4572	1340,0010	511997,8758	8632243,7463	633,2511
PV10	30	512367,1523	8632269,3906	1321,4701	512136,8332	8632334,6762	639,8138
PV11	32	512055,6469	8632239,8478	1422,4814	511811,8711	8632299,5051	629,9276
PV12	33	511899,5145	8632391,0347	1528,7529	511627,2469	8632454,4202	628,6129
PV13	34	511911,5280	8632666,9865	1608,2636	511607,0599	8632739,9166	623,1158
PV14	37	511533,3007	8632148,5161	1593,7523	511265,8698	8632202,0135	629,4059
PV15	43	511515,3619	8631169,7750	1298,0791	511361,3436	8631192,6361	662,4773

QUADRO 4.4 - COORDENADAS (EM METROS) OBTIDAS NAS ORTOFOTOS GERADAS.
FONTE: O autor (2014).

As discrepâncias (Δx , Δy , Δz), suas médias ($\overline{\Delta x}$, $\overline{\Delta y}$, $\overline{\Delta z}$), valores máximos e mínimos, e desvios padrão ($S\Delta x$, $S\Delta y$, $S\Delta z$) para ambos processamentos são apresentados no Quadro 4.5 e no Quadro 4.6, respectivamente.

Processamento Sem GCP										
S/GCP	Xci	Xn (PV)	Yci	Yn (PV)	Zci	Zn (PV)	Δx	Δy	ΔP	Δz
PV 1	511287,509	511088,128	8631470,025	8631505,021	1453,762	618,407	199,381	-34,996	202,429	835,355
PV 2	512522,458	512432,571	8631210,410	8631232,185	919,715	649,375	89,887	-21,775	92,487	270,340
PV 3	513201,681	513175,487	8631055,095	8631063,996	625,278	650,894	26,194	-8,901	27,665	-25,616
PV 4	512700,231	512476,947	8632351,785	8632428,697	1221,532	647,693	223,284	-76,912	236,159	573,839
PV 5	512539,284	512363,157	8631993,991	8632046,844	1149,157	636,099	176,127	-52,853	183,886	513,058
PV 6	512247,912	512098,312	8631628,514	8631664,634	1136,805	633,141	149,600	-36,120	153,899	503,664
PV 7	512065,030	511902,360	8631625,150	8631662,021	1208,163	634,528	162,670	-36,871	166,796	573,635
PV 8	512025,117	511892,740	8631296,747	8631322,312	1128,771	643,616	132,377	-25,565	134,823	485,155
PV 9	512224,216	512000,063	8632184,457	8632240,856	1340,001	639,506	224,153	-56,399	231,139	700,495
PV 10	512367,152	512136,788	8632269,391	8632334,526	1321,470	647,094	230,364	-65,135	239,395	674,376
PV 11	512055,647	511813,498	8632239,848	8632292,875	1422,481	633,656	242,149	-53,027	247,887	788,825
PV 12	511899,515	511626,517	8632391,035	8632445,572	1528,753	631,706	272,998	-54,537	278,392	897,047
PV 13	511911,528	511602,544	8632666,987	8632730,720	1608,264	624,088	308,984	-63,733	315,489	984,176
PV 14	511533,301	511274,408	8632148,516	8632183,212	1593,752	631,338	258,893	-34,696	261,208	962,414
PV 15	511515,362	511354,844	8631169,775	8631193,682	1298,079	651,889	160,518	-23,907	162,289	646,190
Média							190,505	-43,028	195,596	625,530
Desvio Padrão							73,735	19,048	75,348	266,952
Mínimo							26,194	-76,912	27,665	-25,616
Máximo							308,984	-8,901	315,489	984,176

QUADRO 4.5 - RESUMO ESTATÍSTICO DO PROCESSAMENTO SEM GCP (EM METROS).
FONTE: O autor (2014).

Processamento Com 12 GCP										
S/GCP	Xci	Xn (PV)	Yci	Yn (PV)	Zci	Zn (PV)	Δx	Δy	ΔP	Δz
PV 1	511093,991	511088,128	8631493,280	8631505,021	630,761	618,407	5,863	-11,741	13,123	12,354
PV 2	512428,571	512432,571	8631238,108	8631232,185	658,471	649,375	-4,000	5,923	7,147	9,096
PV 3	513163,585	513175,487	8631085,456	8631063,996	675,368	650,894	-11,902	21,460	24,540	24,474
PV 4	512480,112	512476,947	8632421,479	8632428,697	643,284	647,693	3,165	-7,218	7,881	-4,409
PV 5	512359,477	512363,157	8632045,852	8632046,844	632,123	636,099	-3,680	-0,992	3,811	-3,976
PV 6	512094,857	512098,312	8631663,301	8631664,634	631,942	633,141	-3,455	-1,333	3,703	-1,199
PV 7	511900,147	511902,360	8631659,378	8631662,021	633,394	634,528	-2,213	-2,643	3,447	-1,134
PV 8	511893,067	511892,740	8631322,362	8631322,312	647,911	643,616	0,327	0,050	0,331	4,295
PV 9	511997,876	512000,063	8632243,746	8632240,856	633,251	639,506	-2,187	2,890	3,624	-6,255
PV 10	512136,833	512136,788	8632334,676	8632334,526	639,814	647,094	0,045	0,150	0,157	-7,280
PV 11	511811,871	511813,498	8632299,505	8632292,875	629,928	633,656	-1,627	6,630	6,827	-3,728
PV 12	511627,247	511626,517	8632454,420	8632445,572	628,613	631,706	0,730	8,848	8,878	-3,093
PV 13	511607,060	511602,544	8632739,917	8632730,720	623,116	624,088	4,516	9,197	10,246	-0,972
PV 14	511265,870	511274,408	8632202,014	8632183,212	629,406	631,338	-8,538	18,802	20,650	-1,932
PV 15	511361,344	511354,844	8631192,636	8631193,682	662,477	651,889	6,500	-1,046	6,584	10,588
						Média	-1,097	3,265	8,063	1,789
						Desvio Padrão	5,057	8,885	6,897	8,763
						Mínimo	-11,902	-11,741	0,157	-7,280
						Máximo	6,500	21,460	24,540	24,474

QUADRO 4.6 - RESUMO ESTATÍSTICO DO PROCESSAMENTO COM 12 GCP (EM METROS).

FONTE: O autor (2014).

4.2.1.2 2ª Comparação: Configuração nº 03 e nº 04

Os pontos de apoio utilizados para as configurações nº 03 e 04 são apresentadas no Quadro 4.7 e no Quadro 4.8, respectivamente.

Coordenadas dos Pontos de Apoio (UTM)				
Pto	ID	E	N	Z
PA1	9	511088,1284	8631505,021	618,4069
PA2	35	511190,990	8632545,441	612,225
PA3	39	512628,404	8632826,407	650,120
PA4	15	513638,676	8630897,492	657,060
PA5	23	511892,7398	8631322,312	643,6164
PA6	34	511602,5443	8632730,72	624,0882
PA7	37	511274,4083	8632183,212	631,3381

QUADRO 4.7 - COORDENADAS (EM METROS) DOS 07 PONTOS DE APOIO (UTM).

FONTE: O autor (2014).

Coordenadas dos Pontos de Apoio (UTM)				
Pto	ID	E	N	Z
PA1	7	510849,507	8631306,645	640,953
PA2	15	513638,676	8630897,492	657,060
PA3	16	512998,331	8631465,135	657,863
PA4	17	512575,310	8632010,109	641,538
PA5	19	512901,798	8632847,235	654,278
PA6	35	511190,990	8632545,441	612,225
PA7	36	511047,303	8632511,464	611,027

Coordenadas dos Pontos de Apoio (UTM)				
Pto	ID	E	N	Z
PA8	38	510961,725	8631936,679	634,862
PA9	39	512628,404	8632826,407	650,120
PA10	42	511801,084	8631010,887	644,122
PA11	45	511058,329	8630883,744	651,184
PA12	46	511690,109	8631872,094	589,592
PA13	9	511088,1284	8631505,021	618,4069
PA14	13	512432,5712	8631232,185	649,3745
PA15	21	512098,3121	8631664,634	633,1413
PA16	22	511902,3596	8631662,021	634,5281
PA17	29	512000,0625	8632240,856	639,5059
PA18	32	511813,4975	8632292,875	633,656
PA19	20	512363,1572	8632046,844	636,0986
PA20	23	511892,7398	8631322,312	643,6164

QUADRO 4.8 - COORDENADAS (EM METROS) DOS 20 PONTOS DE APOIO (UTM).
FONTE: O autor (2014).

Para a ambas configurações (nº 03 e nº 04) foram considerados 7 pontos de verificação. As discrepâncias entre as coordenadas planialtimétricas de referência (reais) e as dos modelos foram obtidas através dos pontos de verificação localizados na área do levantamento (Quadro 4.9).

Pto	Processamento Com 7 GCP				Processamento Com 20 GCP			
	ID	E	N	Z	ID	E	N	Z
PV1	14	513169,9620	8631082,8727	674,6756	14	513163,5955	8631085,7157	677,1547
PV2	18	512478,9200	8632425,1147	643,8782	18	512480,8445	8632421,6960	645,1547
PV3	30	512135,3556	8632335,4191	639,1026	30	512137,0914	8632334,9618	639,5260
PV4	33	511625,5984	8632454,6978	625,3804	33	511626,3887	8632455,1613	627,0657
PV5	34	511605,9823	8632740,1392	619,6096	34	511606,1560	8632741,4836	623,5791
PV6	37	511264,5153	8632200,5793	626,7886	37	511264,5241	8632201,3523	626,5239
PV7	43	511356,0356	8631186,2533	647,3938	43	511354,7725	8631193,6700	650,8520

QUADRO 4.9 - COORDENADAS OBTIDAS NAS ORTOFOTOS GERADAS.
FONTE: O autor (2014).

As discrepâncias (Δx , Δy , Δz), suas médias ($\overline{\Delta x}$, $\overline{\Delta y}$, $\overline{\Delta z}$), valores máximos e mínimos, e desvios padrão ($S\Delta x$, $S\Delta y$, $S\Delta z$) para as configurações nº 05 e 06 processamentos são apresentados no Quadro 4.10 e no Quadro 4.11, respectivamente.

Processamento Com 20 GCP											
S/GCP	Xci	Xn (PV)	Yci	Yn (PV)	Zci	Zn (PV)	Δx	Δy	ΔP	Δz	
PV 1	513163,596	513175,487	8631085,716	8631063,996	677,155	650,894	-11,891	21,720	24,762	26,261	
PV 2	512480,845	512476,947	8632421,696	8632428,697	645,155	647,693	3,898	-7,001	8,013	-2,538	
PV 3	512137,091	512136,788	8632334,962	8632334,526	639,526	647,094	0,303	0,435	0,531	-7,568	
PV 4	511626,389	511626,517	8632455,161	8632445,572	627,066	631,706	-0,128	9,590	9,591	-4,640	
PV 5	511606,156	511602,544	8632741,484	8632730,720	623,579	624,088	3,612	10,764	11,354	-0,509	
PV 6	511264,524	511274,408	8632201,352	8632183,212	626,524	631,338	-9,884	18,140	20,658	-4,814	
PV 7	511354,773	511354,844	8631193,670	8631193,682	650,852	651,889	-0,071	-0,011	0,072	-1,037	
							Média	-2,023	7,662	10,711	0,736
							Desvio Padrão	5,004	10,383	9,329	7,548
							Mínimo	-11,891	-7,001	0,072	-7,568
							Máximo	3,898	21,720	24,762	26,261

QUADRO 4.10 - RESUMO ESTATÍSTICO DO PROCESSAMENTO COM 20 PONTOS DE APOIO (EM METROS).

FONTE: O autor (2014).

Processamento Com 7 GCP										
S/GCP	Xci	Xn (PV)	Yci	Yn (PV)	Zci	Zn (PV)	Δx	Δy	ΔP	Δz
PV 1	513169,9620	513175,487	8631082,8727	8631063,996	674,6756	650,894	-5,525	18,877	19,668	23,782
PV 2	512478,9200	512476,947	8632425,1147	8632428,697	643,8782	647,693	1,973	-3,582	4,090	-3,814
PV 3	512135,3556	512136,788	8632335,4191	8632334,526	639,1026	647,094	-1,432	0,893	1,688	-7,991
PV 4	511625,5984	511626,517	8632454,6978	8632445,572	625,3804	631,706	-0,918	9,126	9,172	-6,325
PV 5	511605,9823	511602,544	8632740,1392	8632730,720	619,6096	624,088	3,438	9,419	10,027	-4,479
PV 6	511264,5153	511274,408	8632200,5793	8632183,212	626,7886	631,338	-9,893	17,367	19,987	-4,549
PV 7	511356,0356	511354,844	8631186,2533	8631193,682	647,3938	651,889	1,192	-7,428	7,523	-4,495
						Média	-1,595	6,382	10,308	-1,125
						Desvio Padrão	4,745	10,113	7,111	7,274
						Mínimo	-9,893	-7,428	1,688	-7,991
						Máximo	3,438	18,877	19,987	23,782

QUADRO 4.11 - RESUMO ESTATÍSTICO DO PROCESSAMENTO COM 7 PONTOS DE APOIO (EM METROS).

FONTE: O autor (2014).

4.2.2 Análise de Tendência

4.2.2.1 Configurações nº 01 e 02

De posse dos dados estatísticos, calculados através dos pontos de verificação coletados nas configurações em estudo, realizaram-se os testes de tendência ao nível de significância $\alpha = 10\%$, definidos pelo Decreto-lei nº 89.817. Foi utilizado o teste t-Student com $n = 15$ amostras e 14 grau de liberdade. A Tabela 4.1 apresenta os resultados das análises de tendência para as distintas configurações nº 01 e 02.

TABELA 4.1 - RESULTADOS DA ANÁLISE DE TENDÊNCIA PARA AS CONFIGURAÇÕES Nº 01 E 02.

Análise de Tendência – t Student		
Dados	Sem GCP	Com 12 GCP
Nível de confiança	90%	90%
Nível de significância	10%	10%
Amostra	15	15
Graus de Liberdade	14	14
T tabelado	1,761310136	1,761310136
Tx calculado	10,0064533	0,840251337
Tendência em x	Sim	Não
Ty calculado	8,452047583	1,37501262
Tendência em y	Sim	Não
Tz calculado	9,075299618	0,790479598
Tendência em z	Sim	Não

FONTE: O autor (2014).

Respeitando as hipóteses anteriormente mencionadas e comparando os testes calculados com o teste tabelado, concluiu-se que não foram rejeitadas as hipóteses H_0 do processamento em que se utilizou o Agisoft PhotoScan com 12 pontos de apoio, ou seja, as médias são iguais à zero, e com isso, não há presença de erros sistemáticos para o nível de significância $\alpha = 10\%$. Entretanto, para as demais configurações a análise estatística acusou a existência de tendência em alguma direção. A ocorrência de problemas e o seu efeito pode ser minimizado pela subtração de seu valor a cada coordenada lida na carta (GALO; CAMARGO, 1994).

4.2.2.2 Configurações nº 03 e 04

Foi utilizado o teste t-Student com nível de significância $\alpha = 10\%$, com $n = 7$ amostras e 6 grau de liberdade. A Tabela 4.2 apresenta os resultados das análises de tendência.

TABELA 4.2 - RESULTADOS DA ANÁLISE DE TENDÊNCIA PARA AS CONFIGURAÇÕES Nº 03 E 04.

Análise de Tendência – t Student		
Dados	Com 7 GCP	Com 20 GCP
Nível de confiança	90%	90%
Nível de significância	10%	10%
Amostra	7	7
Graus de Liberdade	6	6
T tabelado	1,943180281	1,943180281
Tx calculado	-0,88928161	-1,069727537
Tendência em x	Não	Não

Análise de Tendência – t Student		
Dados	Com 7 GCP	Com 20 GCP
Ty calculado	1,545665144	1,807636616
Tendência em y	Não	Não
Tz calculado	-0,409040355	0,258137008
Tendência em z	Não	Não

FONTE: O autor (2014).

Em ambas análises foi verificado que ao se utilizar somente os pontos de apoio, obtidos através de rastreo GNSS, não são verificadas tendências nas coordenadas, ou seja, não há a presença de erros sistemáticos para o nível de significância $\alpha = 10\%$.

4.2.3 Análise de Exatidão

4.2.3.1 Configurações nº 01 e 02

Com a não rejeição da hipótese H_0 no teste de médias para o processamento com 12 pontos de apoio, passou-se à avaliação da precisão posicional utilizando o Teste Qui-quadrado, ao nível de significância $\alpha = 10\%$ e $n = 15$ amostras (pontos de verificação), ou seja, 14 graus de liberdade.

Os testes de exatidão foram realizados para escalas e classes pré-definidas, conforme a Especificação Técnica para a Aquisição de Dados Geoespaciais Vetoriais (CONCAR-EB, 2011), aplicados aos produtos digitais.

Portanto, calculou-se, inicialmente, o valor tabelado de $\chi^2_{(14.10)} = 7,78953361$ para um nível de confiança de 90%. No Quadro 4.12 e no Quadro 4.13 estão apresentados os valores de EP e no Quadro 4.14 o valor σ_p^2 para a planimetria e altimetria.

	PEC-PCD	1 P/ 1000	1 P/ 2000	1 P/ 5000	1 P/ 10000	1 P/ 25000	1 P/ 50000	1 P/ 100000	1 P/ 250000
Planimétrico	A - EP	0,17	0,34	0,85	1,7	4,25	8,51	17,02	42,55
	B - EP	0,3	0,6	1,5	3	7,5	15	30	75
	C - EP	0,5	1	2,5	5	12,5	25	50	125
	D - EP	0,6	1,2	3	6	15	30	60	150

QUADRO 4.12 - ERRO PADRÃO (EP) DO PEC-PCD NAS DISTINTAS ESCALAS E CLASSES (PLANIMETRIA).

FONTE: CONCAR-EB (2011).

	PEC-PCD	1 P/ 1000	1 P/ 2000	1 P/ 5000	1 P/ 10000	1 P/ 25000	1 P/ 50000	1 P/ 100000	1 P/ 250000
Altimétrico	A - EP	0,17	0,17	0,34	0,84	1,67	3,33	8,33	16,67
	B - EP	0,33	0,33	0,66	1,67	3,33	6,66	16,66	33,33
	C - EP	0,4	0,4	0,8	2	4	8	20	40
	D - EP	0,5	0,5	1	2,5	5	10	25	50

QUADRO 4.13 - ERRO PADRÃO (EP) DO PEC-PCD NAS DISTINTAS ESCALAS E CLASSES (ALTIMETRIA).

FONTE: CONCAR-EB (2011).

	σ_p^2 calculado	1 P/ 1000	1 P/ 2000	1 P/ 5000	1 P/ 10000	1 P/ 25000	1 P/ 50000	1 P/ 100000	1 P/ 250000
Planimétrico	Classe A	0,01445	0,0578	0,36125	1,445	9,03125	36,21005	144,8402	905,25125
	Classe B	0,045	0,18	1,125	4,5	28,125	112,5	450	2812,5
	Classe C	0,125	0,5	3,125	12,5	78,125	312,5	1250	7812,5
	Classe D	0,18	0,72	4,5	18	112,5	450	1800	11250
	σ_p^2 calculado	1 P/ 1000	1 P/ 2000	1 P/ 5000	1 P/ 10000	1 P/ 25000	1 P/ 50000	1 P/ 100000	1 P/ 250000
Altimétrico	Classe A	0,01445	0,01445	0,0578	0,3528	1,39445	5,54445	34,69445	138,94445
	Classe B	0,05445	0,05445	0,2178	1,39445	5,54445	22,1778	138,7778	555,44445
	Classe C	0,08	0,08	0,32	2	8	32	200	800
	Classe D	0,125	0,125	0,5	3,125	12,5	50	312,5	1250

QUADRO 4.14 - VARIÂNCIAS AMOSTRAIS CALCULADAS ATRAVÉS DO EP PARA A PLANIMETRIA E ALTIMETRIA.

FONTE: O autor (2014).

Dessa forma, pode-se realizar a estatística calculando os valores $\chi^2_{(calculados)}$ para a planimetria (x, y) e altimetria (z) (Quadro 4.15, Quadro 4.16 e Quadro 4.17).

χ^2 calculado x	1 P/ 1000	1 P/ 2000	1 P/ 5000	1 P/ 10000	1 P/ 25000	1 P/ 50000	1 P/ 100000	1 P/ 250000
Classe A	8608,320792	2152,080198	344,3328317	86,08320792	13,77331327	3,4352406	0,858810161	0,137409626
Classe B	2764,227454	691,0568636	110,5690982	27,64227454	4,422763927	1,105691	0,276422745	0,044227639
Classe C	995,1218835	248,7804709	39,80487534	9,951218835	1,592195014	0,3980488	0,099512188	0,01592195
Classe D	691,0568636	172,7642159	27,64227454	6,910568636	1,105690982	0,2764227	0,069105686	0,01105691

QUADRO 4.15 - CÁLCULO ESTATÍSTICO PARA A COORDENADA X.

FONTE: O autor (2014).

χ^2 calculado y	1 P/ 1000	1 P/ 2000	1 P/ 5000	1 P/ 10000	1 P/ 25000	1 P/ 50000	1 P/ 100000	1 P/ 250000
Classe A	8608,320792	2152,080198	344,3328317	86,08320792	13,77331327	3,4352406	0,858810161	0,137409626
Classe B	2764,227454	691,0568636	110,5690982	27,64227454	4,422763927	1,105691	0,276422745	0,044227639
Classe C	995,1218835	248,7804709	39,80487534	9,951218835	1,592195014	0,3980488	0,099512188	0,01592195
Classe D	691,0568636	172,7642159	27,64227454	6,910568636	1,105690982	0,2764227	0,069105686	0,01105691

QUADRO 4.16 - CÁLCULO ESTATÍSTICO PARA A COORDENADA Y.

FONTE: O autor (2014).

χ^2 calculado z	1 P/ 1000	1 P/ 2000	1 P/ 5000	1 P/ 10000	1 P/ 25000	1 P/ 50000	1 P/ 100000	1 P/ 250000
Classe A	8490,404458	8490,404458	2122,601114	347,7504093	87,9818885	22,127775	3,53619511	0,882988449
Classe B	2253,192735	2253,192735	563,2981837	87,9818885	22,12777542	5,5319439	0,884048777	0,220879594
Classe C	1533,579305	1533,579305	383,3948263	61,34317221	15,33579305	3,8339483	0,613431722	0,153357931
Classe D	981,4907553	981,4907553	245,3726888	39,25963021	9,814907553	2,4537269	0,392596302	0,098149076

QUADRO 4.17 - CÁLCULO ESTATÍSTICO PARA A COORDENADA Z.

FONTE: O autor (2014).

Em seguida, verificou-se se o valor acima calculado se encontrava no intervalo de aceitação, ou seja, menor que o valor tabelado. Não sendo obedecida, rejeita-se a hipótese nula, isto é, o produto não atendeu à precisão pré-estabelecida.

O Quadro 4.18 apresenta a classificação quanto ao atendimento da configuração para as distintas classes e escalas do PEC-PCD.

χ^2 calculado x		1 P/ 1000	1 P/ 2000	1 P/ 5000	1 P/ 10000	1 P/ 25000	1 P/ 50000	1 P/ 100000	1 P/ 250000
	A	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Atende	Atende	Atende
	B	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Atende	Atende	Atende	Atende
	C	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Atende	Atende	Atende	Atende
	D	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende
χ^2 calculado y		1 P/ 1000	1 P/ 2000	1 P/ 5000	1 P/ 10000	1 P/ 25000	1 P/ 50000	1 P/ 100000	1 P/ 250000
	A	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Atende	Atende	Atende
	B	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Atende	Atende	Atende	Atende
	C	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Atende	Atende	Atende	Atende
	D	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende
χ^2 calculado z		1 P/ 1000	1 P/ 2000	1 P/ 5000	1 P/ 10000	1 P/ 25000	1 P/ 50000	1 P/ 100000	1 P/ 250000
	A	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Atende	Atende
	B	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Atende	Atende	Atende
	C	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Atende	Atende	Atende
	D	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Atende	Atende	Atende

QUADRO 4.18 - CLASSIFICAÇÃO DO PRODUTO CARTOGRÁFICO QUANTO ÀS CLASSES E ESCALAS.
FONTE: O autor (2014).

Comparando os testes calculados para cada classe com o teste tabelado, pode-se concluir que, para a o processamento através do software Agisoft PhotoScan com 12 pontos de apoio, que não se rejeitaram as hipóteses H_0 nas direções X e Y para a classe D da escala 1:10.000, classe B, C e D da escala 1:25.000 e todas as classes das escalas 1:50.000, 1:100.000 e 1:250.000, ao nível de significância de $\alpha = 10\%$, enquanto que, para não se rejeita H_0 na direção Z para a classe B, C e D da escala 1:50.000 e todas as classes para as escalas 1:100.000 e 1:250.000. As demais classes de escalas o produto cartográfico foi rejeitado em relação à exatidão dos valores.

4.2.3.2 Configurações nº 03 e 04

Com a não rejeição da hipótese H_0 no teste de médias para ambos processamentos, passou-se à avaliação da precisão posicional utilizando o Teste Qui-quadrado, ao nível de significância $\alpha = 10\%$ e $n = 7$ amostras (pontos de verificação), ou seja, 6 graus de liberdade.

A sequência dos cálculos estatísticos através do teste Qui-quadrado foram realizadas conforme descrito no item 4.2.3.1. Tanto para o processamento com 7 pontos de apoio, quanto para o processamento com 12 pontos de apoio o valor tabelado de $\chi^2_{(6,10)} = 2,204130656$, pois utilizou-se a mesma quantidade de graus de liberdade. O Quadro 4.18 e o Quadro 4.19 apresentam a classificação dos produtos cartográficos quanto às classes e escalas.

χ^2 calculado x		1 P/ 1000	1 P/ 2000	1 P/ 5000	1 P/ 10000	1 P/ 25000	1 P/ 50000	1 P/ 100000	1 P/ 250000
	A	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Atende	Atende	Atende
	B	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Atende	Atende	Atende	Atende
	C	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Atende	Atende	Atende	Atende
	D	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende
χ^2 calculado y		1 P/ 1000	1 P/ 2000	1 P/ 5000	1 P/ 10000	1 P/ 25000	1 P/ 50000	1 P/ 100000	1 P/ 250000
	A	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Atende	Atende	Atende
	B	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Atende	Atende	Atende	Atende
	C	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Atende	Atende	Atende	Atende
	D	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Atende	Atende	Atende	Atende
χ^2 calculado z		1 P/ 1000	1 P/ 2000	1 P/ 5000	1 P/ 10000	1 P/ 25000	1 P/ 50000	1 P/ 100000	1 P/ 250000
	A	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Atende	Atende
	B	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Atende	Atende	Atende
	C	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Atende	Atende	Atende
	D	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Atende	Atende	Atende

QUADRO 4.19 - CLASSIFICAÇÃO DO PRODUTO CARTOGRÁFICO QUANTO ÀS CLASSES E ESCALAS – 7 PONTOS DE APOIO.

FONTE: O autor (2014).

χ^2		1 P/ 1000	1 P/ 2000	1 P/ 5000	1 P/ 10000	1 P/ 25000	1 P/ 50000	1 P/ 100000	1 P/ 250000
calculado x	A	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Atende	Atende	Atende
	B	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Atende	Atende	Atende	Atende
	C	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Atende	Atende	Atende	Atende
	D	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende
χ^2		1 P/ 1000	1 P/ 2000	1 P/ 5000	1 P/ 10000	1 P/ 25000	1 P/ 50000	1 P/ 100000	1 P/ 250000
calculado y	A	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Atende	Atende	Atende
	B	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Atende	Atende	Atende
	C	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Atende	Atende	Atende	Atende
	D	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Atende	Atende	Atende	Atende
χ^2		1 P/ 1000	1 P/ 2000	1 P/ 5000	1 P/ 10000	1 P/ 25000	1 P/ 50000	1 P/ 100000	1 P/ 250000
calculado z	A	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Atende	Atende
	B	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Atende	Atende	Atende
	C	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Atende	Atende	Atende
	D	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Atende	Atende	Atende

QUADRO 4.20 - CLASSIFICAÇÃO DO PRODUTO CARTOGRÁFICO QUANTO ÀS CLASSES E ESCALAS – 20 PONTOS DE APOIO.

FONTE: O autor (2014).

Comparando os testes calculados para cada classe com o teste tabelado, pode-se concluir que, para a o processamento através do software Agisoft PhotoScan com 7 pontos de apoio, que não se rejeitaram as hipóteses H_0 nas direções X para a classe D da escala 1:10.000, direções X e Y da classe B, C e D da escala 1:25.000 e todas as classes das escalas 1:50.000, 1:100.000 e 1:250.000, ao nível de significância de $\alpha = 10\%$, enquanto que para a direção Z não se rejeita H_0 para a classe B, C e D da escala 1:50.000 e todas as classes para as escalas 1:100.000 e 1:250.000. As demais classes de escalas o produto cartográfico foi rejeitado em relação à exatidão dos valores.

Para o processamento com 20 pontos de apoio o teste Qui-quadrado apresentou-se muito parecido com o processamento com 7 pontos de apoio, exceto para a direção Y, onde não se rejeitaram as hipóteses H_0 para as classes B e C.

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Considerando o que foi apresentado nesta pesquisa no que tange a qualidade cartográfica de ortofotos oriundas de VANT's, os principais aspectos que têm maior influência sobre a precisão dos dados e a qualidade do produto final são: o número de pontos de controle (GCP), a qualidade dos sensores embarcados (integração GNSS/INS), a calibração da câmera, a estabilidade da plataforma e a consistência do bloco fotogramétrico (processamento através de ferramenta computacional).

Tendo como base os dados brutos, quando os pontos de controle na área de interesse estão distribuídos uniformemente, a precisão absoluta sobre esta área pode ser controlada. O emprego de alvos pré-sinalizados, de modo geral, contribuiu para aumentar a precisão das ortofotos. Os parâmetros de orientação exterior das imagens via integração GNSS/INS, geralmente apresentam inexatidão devido aos sensores embarcados. O alto custo destes sensores aliado à instabilidade da plataforma VANT e os riscos operacionais a ela associados são fatores que ainda impossibilitam o embarque de sensores mais precisos.

Neste trabalho foram apresentados e discutidos os resultados obtidos do estudo realizado sobre a utilização do SISVANT Modelo Smartbird X-260 para a obtenção de ortofotos, em diferentes configurações, de uma porção de área rural com tamanho intermediário (aproximadamente 4 km²), situada sobre terreno cárstico, ou seja, com variações significativas em seu relevo, caracterizado por cavidades subterrâneas (cavernas). A partir dos resultados obtidos pode-se chegar as principais conclusões:

- Para áreas intermediárias (> 3 km²), a seleção e filtragem das fotografias se faz necessário nas situações em que a placa controladora do SISVANT não possibilite estabelecer o intervalo de tomada de cada fotografia. Nestes casos, o número excessivo de imagens sobrepostas faz com que o processamento demande grande espaço para armazenamento dos dados, bem como potentes hardwares e softwares de processamento;
- Foi definida uma faixa de recobrimento lateral acima do usualmente adotado para a aerofotogrametria convencional (30%) devido, principalmente, à instabilidade da plataforma. As variações atmosféricas afastam a verticalidade da câmera no instante da tomada das fotografias e provocam variações significativas nos recobrimentos entre faixas de voo;
- A pré-sinalização se mostrou eficaz, uma vez que regiões com mata nativa apresentam dificuldade na definição de feições naturais para a seleção de pontos de controle, principalmente nas bordas do bloco.

- O SISVANT não apresentou exatidão dos parâmetros de orientação exterior através da determinação direta, extraídos da integração GNSS/INS, dessa forma as atitudes da plataforma não foram utilizadas no processamento inicial, sendo estimados pelo software.
- A qualidade das câmeras digitais, aliada às resoluções crescentes, com preços decrescentes, fazem destes equipamentos uma solução para fotogrametria digital, porém as fotografias obtidas apresentaram distorções radiocêntricas provocadas pela sua não calibração, ou seja, quanto mais distante os objetos estavam do centro, maiores foram as distorções verificadas. Tal situação implicou diretamente na qualidade dos produtos finais obtidos, não obstante permite a sua aplicação visando a atualização das feições no terreno em uma carta 1/10.000;
- A amostragem foi restringida pelos pontos disponíveis para área de estudo e apenas indica a potencialidade do SISVANT para aplicações de mapeamento temático. Assim sendo, foram consideradas 04 diferentes configurações de processamento, empregando ou não pontos de apoio;
- A configuração nº 02 (vide Quadro 4.18), 12 pontos de apoio e 15 pontos de verificação, foi a que apresentou o melhor resultado. Foi realizado uma análise de tendência e de precisão em suas componentes posicionais, onde os resultados foram:
 - É acurado para a escala 1:10.000, ou seja, é preciso e não apresenta tendência planimétrica para a classe D da referida escala;
 - Com relação a análise altimétrica, é acurado para a equidistância vertical de 20 metros das curvas de nível, escala 1:50.000, classe B, é preciso e não apresenta tendência; e
 - Identificou-se tanto para a análise planimétrica, quanto altimétrica, a presença de um *outlier* (valor atípico) em cada, o que pode ter acarretado prejuízos na interpretação dos resultados dos testes estatísticos aplicados as amostras.

Visto os resultados obtidos pode-se completar, que os VANT's podem ser perfeitamente utilizados em mapeamentos temáticos sobretudo quanto ao uso e cobertura da terra e atualização de bases cartográficas preexistentes.

Após a conclusão do presente trabalho, mediante a análise dos resultados obtidos, com a utilização da metodologia aqui proposta, fazem-se as seguintes recomendações para trabalhos futuros:

- Existe uma perspectiva promissora quanto à utilização de produtos oriundos de mapeamento com SISVANT em virtude da qualidade geométrica em que podem ser obtidos, entretanto recomenda-se realizar estudos semelhantes aos neste apresentado, para grandes áreas, utilizando-se de um denso apoio de campo, rígido controle do processamento digital, através de eficientes rotinas computacionais, auto calibração das câmeras não métricas e integração entre receptor GNSS geodésico e sistema inercial de alta precisão.
- Todas as aeronaves, tripuladas ou não, estão sujeitas à intervenções atmosféricas constantes. Dessa forma, esforços devem ser concentrados em estudos para a estabilização dos voos com a plataforma VANT, pois sua utilização é restrita a condições de vento favoráveis, a fim de se obter melhores resultados fotogramétricos.
- Recomenda-se elaborar um prognóstico das reais capacidades técnicas da plataforma VANT a ser utilizada para cada trabalho específico, a fim de possibilitar o operador a obtenção do êxito em seus objetivos.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL. **Instrução Suplementar (IS) Nº 21-021 – Revisão A**. Apresentação de Dados Requeridos para Certificação Suplementar de Tipo. 2012. Disponível em: <<http://www2.anac.gov.br/biblioteca/IS/2014/IS21-021A.pdf>> Acesso em: 03 mar 2015.

AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL. **Decisão nº 127, de 29 de novembro de 2011**. Autoriza a operação aérea de Aeronave Remotamente Pilotada do Departamento de Polícia Federal. Disponível em: <<http://goo.gl/OCxvF6> > Acesso em: 03 mar 2015.

AGISOFT. **Photo Scan User Manual: Professional Edition, Version 1.0.0**. 2013. Disponível em: <<http://goo.gl/9fAAo8>> Acesso em: 03 mar 2015.

AGOSTINHO, F; OLIVEIRA FILHO, P. C. de. Obtenção de fotografias aéreas de pequeno formato e videografia por meio de aeromodelo artesanal adaptado. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15, Curitiba, **Anais...** Curitiba, 2011.

ALVES JUNIOR, L. R.; CÔRTEZ, J. B. R.; FERREIRA, M. E. Validação de mosaicos aerofotogramétricos utilizando fotografias obtidas com câmara digital não métrica acoplada a um VANT. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA, 25. Curitiba. **Anais....** Curitiba, 2013.

ANDRADE, J. B. **Fotogrametria**. Curitiba: SBEE, 1998.

ANTUNES, A. F. B.; LINGNAU, C. Uso de Índices de Acurácia para Avaliação de Mapas Temáticos Obtidos por Meio de Classificação Digital. In: CONGRESSO E FEIRA PARA USUÁRIOS DE GEOPROCESSAMENTO, 3. Curitiba, **Anais...** Curitiba, 1997.

ARIZA, F. J. **Calidad en la producción cartográfica**. Madrid: RA-MA, 2002.

ARRUDA JR, E. R. **Mosaicagem de imagens digitais**. 94. f. Dissertação (Mestrado em Cartografia) - Setor de Ciência e Tecnologia. Universidade Estadual Paulista. Presidente Prudente, 2002.

-----, E. R.; HASEGAWA, J. K.; IMAI, N. N. Atualização Cartográfica baseada em Imagens Digitais Retificadas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CADASTRO TÉCNICO MULTIFINALITÁRIO (COBRAC). **Anais...** Florianópolis, 2000.

ASPIAZÚ, C.; ALVES, L. M.; VALENTE, O. F. Os modelos digitais de terrenos conceituação e importância. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Colombo, n.21, dez. p.27-36, 1990.

BARRY, P.; COAKLEY, R. Field accuracy test of rpas photogrammetry In: **International archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences**, volume XL-1/W2, UAV-g2013, Rostock, Germany, 2013.

BRASIL. Decreto n º 89.817, de 20 de junho de 1984. **Instruções Reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia Nacional**. Diário Oficial da União. Brasília, 1984.

BRASIL. Ministério da Defesa. **Portaria Normativa nº 606/MD, de 11 de junho de 2004**. Diário Oficial da União nº 112 - seção 01, Brasília, 2004.

BRASIL. Departamento de Controle do Espaço Aéreo – DECEA. **AIC nº 21/10, de 23 de setembro de 2010**. Informações necessárias para o uso de veículos aéreos não tripulados no espaço aéreo brasileiro. Rio de Janeiro, 2010.

BRITO, J.; COELHO, L. **Fotogrametria Digital**. Rio de Janeiro: Instituto Militar de Engenharia, 2002.

CASTRO, A. A. M.; PRADO, P. P. L. Algoritmos para reconhecimento de padrões. **Rev. Ciênc. Exatas**, Universidade de Taubaté. Taubaté, v. 5-8, p. 129-145, 2002.

COMISSÃO NACIONAL DE CARTOGRAFIA (CONCAR-EB). **Especificação Técnica para Estruturação de Dados Geoespaciais Vetoriais (ET-EDGV)**. Estrutura de Dados Geoespaciais Vetoriais (EDGV). Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais (INDE). Diretoria de Serviço Geográfico (DSG). 2011.

CÔRTEZ, J.B.R. **O uso de fotografias aéreas de pequeno formato digitalizadas em mapeamento topográfico planimétrico**. 98f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) - Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1998.

COSTA, G. C.; SILVA, D. C. Pré-sinalização de pontos de apoio em aerofotogrametria com câmeras de pequeno formato. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS E TECNOLOGIAS DA GEOINFORMAÇÃO, 4. Recife. **Anais....** Recife, 2012.

CUNHA, R. M. P.; BULLA, L. A. S.; HARTMANN, C. Uso de imagens de pequeno formato como instrumento na elaboração e implantação de projetos costeiros. O sistema ADAR 1000. Porto Alegre, **GRAVEL**, v. 7., n. 1., p. 47-56, jul. 2009.

DALMOLIN, Q.; LEAL, E. M. Análise da qualidade posicional em bases cartográficas geradas em CAD. **Boletim de ciências geodésicas**, Curitiba, v. 7, n. 1, p. 21-40, 2001.

FELGUEIRAS, C. A. **Modelagem Numérica de Terreno**. INPE-8081-PRE/3896. São José dos Campos : Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2001.

FERREIRA, A. M. R.; ROIG, H. L.; MAROTTA, G. S.; MENEZES, P. H. B. J. Utilização de aeronaves remotamente pilotadas para extração de mosaico georreferenciado multiespectral e modelo digital de elevação de altíssima resolução espacial. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 16. Foz do iguaçu, PR, Brasil, **Anais....** p 9308 - 93015, 2013.

------. **Avaliação de câmara de pequeno formato transportada por veículo aéreo não tripulado – VANT, para uso em aerolevantamentos**. Dissertação (Mestrado em Geociências Aplicadas) . Universidade de Brasília. Brasília, 2014.

GALO, M., CAMARGO, P. O. Utilização do GNSS no controle de qualidade de cartas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CADASTRO TÉCNICO MULTIFINALITÁRIO, 1. – COBRAC, **Anais...** v. 2, Florianópolis, 1994.

-----.; DAL POZ, A. P.; FERREIRA, F. M. Uso de Feições no Controle de Qualidade em Cartografia. In: CBC - Congresso Brasileiro de Cartografia, 19. Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre, Brasil, 2001.

-----.; TOMMASELLI, A. M. G.; HASEGAWA, J. K.; CAMARGO, P. O. Significância dos parâmetros de orientação interior na calibração de câmaras. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS E TECNOLOGIAS DA GEOINFORMAÇÃO, 2, Recife. **Anais...** Recife, 2008.

GEMAEL, C. **Introdução ao ajustamento de observações: aplicações Geodésicas**. Curitiba: Editora UFPR. 1994.

GONÇALVES, G. A. **Detecção automática de alterações na cartografia cadastral com base em imagens de câmaras digitais**. 265f. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) - Setor de Ciências da Terra . Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

LIMA, D. L.; COSTA, E. R.; YAMASHIRO, P. M.; KIM, W.; TOMMASELLI, A. M. G.; HASEGAWA, J. K.; GALO, M. Restituição e geração de ortoimagens a partir de um estereopar EROS. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS E TECNOLOGIAS DA GEOINFORMAÇÃO, 1, Pernambuco. **Anais...** Pernambuco, 2004.

LIMA, E. M.; THOMAZ, T. A. M.; SEVERO, T. C. **Mapeamento aerofotogramétrico digital utilizando fotografias de médio formato.** Monografia (Graduação em Engenharia Cartográfica) - Instituto de Geociências. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2010.

LUGNANI, J. B. **Introdução à Fototriangulação.** Curitiba, 1987.

MACHADO, A. M. L. **Extração automática de contornos de edificações utilizando imagem gerada por câmera digital de pequeno formato e dados LIDAR.** 201f. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) - Setor de Ciências da Terra. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

MARTINS, M. A. R. Geração de ortoimagens a partir de georreferenciamento direto de imagens digitais aéreas de pequeno formato com dados LIDAR. **Boletim de Ciências Geodésicas** - Universidade Federal do Paraná. Curitiba, v. 17, n. 4, 2010.

MEDEIROS, F. A. **Desenvolvimento de um veículo aéreo não tripulado para aplicação em agricultura de precisão.** Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2007.

MEDINA, A. S.; MEDINA, S. S. S. **A representação da superfície topográfica através de modelos digitais de terreno.** Graphica. Curitiba, 2007.

MERCHANT, D. C. Spatial Accuracy Standards for Large Scale Line Maps. In: **Technical Congress on Surveying and Mapping.** Proceedings. v. 1, p. 222-231, 1982.

MIKHAIL, E. M.; ACKERMAN, F. **Observations and Least Squares.** Lanham: University Press of America, 1976.

-----; HELAVA, U.V.; JANCAITIS, J.R.; DOYLE, F.J.; HELMERING, R.J.; ACKERMANN, F.; TURNER, A.K. Panel discussion: the future of DMT. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing.** v.44, n.12, 1978, p.1487-1497.

-----; BETHEL, J.S.; MCGLONE, J.C. **Introduction to Modern Photogrammetry.** New York: John Wiley & Sons, 2001.

MITSHITA, E. A. **Detecção de erros grosseiros nas aerotriangulações**. 245f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) - Setor de Ciências da Terra. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 1986.

-----; GONÇALVES, J. E.; GRAÇA, N.; CENTENO, J.; MACHADO, A. O uso de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) em aplicações de mapeamento aerofotogramétrico. In: Congresso Brasileiro de Cartografia, 26. Gramado. **Anais...** Gramado, 2014.

MONICO, J. F. G.; DAL PÓZ, A. P.; GALO, M.; SANTOS, M. C.; OLIVEIRA, L. C. Acurácia e precisão: revendo os conceitos de forma acurada. In: **Bol. Ciênc. Geod.**, v. 15, nº 3, p. 469-483. Curitiba, 2009.

MORO, R. C. **Avaliação de produtos fotogramétricos obtidos por um VANT**. Monografia (Graduação em Engenharia Cartográfica). Setor de Ciências da Terra. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2013.

OLIVEIRA, F. A. CTA e o Projeto VANT. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE VANT I. São José dos Campos, 21 jun.2005. **Anais....** São José dos Campos, 2005.

PALERMO, R. A.; LEITE, T. C. **Integração de levantamento fotogramétrico aéreo com uso de VANT e levantamento fotogramétrico terrestre para o mapeamento tridimensional das ruínas de São Miguel das Missões**. Projeto Cartográfico. Curso de Engenharia Cartográfica. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2013.

REISS, M. L. L. **Reconstrução tridimensional digital de objetos a curta distância por meio de luz estruturada**. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas) - Setor de Ciência e Tecnologia. Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho. Presidente Prudente, 2007.

-----. **Fotogrametria I**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2008.

-----. **Fotogrametria II**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2012.

ROBERTO, A. J. **Extração de Informação Geográfica a partir de Fotografias Aéreas obtidas com VANTs para apoio a um SIG Municipal**. 93f. Dissertação (Mestrado. Sistema de Informações Geográficas) – Departamento de Geociências, Ambiente e Ordenamento do Território, Universidade do Porto, Porto, 2013.

ROCHA, C. H. B. **Geoprocessamento Tecnologia Transdisciplinar**. Juiz de Fora, 2000.

ROCHA, R. S. **Exatidão cartográfica para as cartas digitais urbanas**. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção e Sistemas) - Centro Tecnológico. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2002.

SANTOS, A. G.; SEGANTINE, P. C. L. Avaliação da Qualidade das Coordenadas geográficas de Mapas digitais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CADASTRO TÉCNICO MULTIFINALITÁRIO. UFSC. Florianópolis, **Anais...** Florianópolis, 2006.

SANTOS, D. R. **Elementos de Fotogrametria e Sensoriamento Remoto**. Curso de Engenharia Cartográfica. Departamento de Geomática. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2013.

----- **Fotogrametria I**. Curso de Engenharia Cartográfica. Departamento de Geomática. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2014.

----- **Uso do aplicativo SOCET SET em projetos fotogramétricos**. Curitiba: Departamento de Geomática. Universidade Federal do Paraná. 2010.

SANTOS, M. C. **Revisão de conceitos em projeção, homografia, calibração de câmera, geometria epipolar, mapas de profundidade e varredura de planos**. Visão Computacional. Campinas: Unicamp, 2012.

SANTOS, M. S. T.; SILVA, E. B. S.; SOUZA, A. M.; TEIXEIRA, W. L. E.; SCHMIDT, A. C. P. S.; FRANCELINO, A. V. M.; SABADIA, J. A. B.; LIMA FILHO, F. P. Geração e análise estatística de modelo digital de elevação (MDE) com dados de GNSS em tempo real (GNSS/RTK). Departamento de Geologia. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. **Rev. Estudos Geológicos**, v. 18 n. 1. 2008.

SERRA, L. A. O. **O potencial dos UAV para atualização de cartografia municipal**. Dissertação de mestrado. Departamento de Engenharia Geográfica, Geofísica e Energia. Lisboa: Universidade de Lisboa, 2014.

SILVA, D. C.; MELO, I. D. F.; OLIVEIRA, R. N. Q. Alta resolução com uso de câmaras digitais de baixo custo para mapeamento. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12. São José dos Campos. **Anais...** São José dos Campos, 2005.

SILVA, E. T. J. B. Veículos Aéreos Não Tripulados: Panorama atual e perspectivas para o monitoramento de atividades ilícitas na Amazônia. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 16. Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu, 2013.

SILVEIRA, F. J. C.; BRITO, J. L. N. S. **Fototriangulação pelo método dos feixes perspectivos**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Computação – Geomática. UFRJ. Rio de Janeiro, 2004.

THAPA, K.; BOSSLER, J. Accuracy of Spatial Data Used in Geographic Information-Systems. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**. v. 58, p. 835-41, 1992.

WOLF, P. R. **Elements of photogrammetry with applications in GIS**. 3. ed. New York: Mac Graw Hill, 2004.

ZANARDI, R. **Geração de modelo digital de terreno a partir de par estereoscópico do sensor CCD do satélite CBERS-2 e controle de qualidade das informações altimétricas**. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto de Geociências. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2006.

ANEXO I - DECRETO Nº 89.817 DE 20 DE JUNHO DE 1984

Estabelece as Instruções Reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia Nacional. O Presidente da República, usando da atribuição que lhe confere o artigo 81, item III, da Constituição e tendo em vista o disposto no artigo 2º, nos incisos 4 e 5 do artigo 5º e no artigo 18 do Decreto-lei nº 243, de 28 de fevereiro de 1967, DECRETA: Instruções Reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia Nacional

CAPÍTULO I

Disposições Iniciais:

Art.1º: Este Decreto estabelece as normas a serem observadas por todas as entidades públicas e privadas produtoras e usuárias de serviços cartográficos, de natureza cartográfica e atividades correlatas, sob a denominação de Instruções Reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia Nacional.

Art.2º: As Instruções Reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia Nacional se destinam a estabelecer procedimentos e padrões a serem obedecidos na elaboração e apresentação de normas da Cartografia Nacional, bem como padrões mínimos a serem adotados no desenvolvimento das atividades cartográficas.

Art.3º: As entidades responsáveis pelo estabelecimento de normas cartográficas, obedecidas as presentes Instruções, apresentarão suas normas à Comissão de Cartografia - CONCAR para homologação e inclusão na Coletânea Brasileira de Normas Cartográficas.

Art.4º: As normas cartográficas, legalmente em vigor nesta data, serão homologadas como Normas Cartográficas Brasileiras, após apresentação à COCAR e devido registro.

Art.5º: Para efeito destas Instruções, define-se:

I- Em caráter geral:

1. Serviço Cartográfico ou de Natureza Cartográfica - é toda operação de representação da superfície terrestre ou parte dela, através de imagens, cartas, plantas e outras formas de expressão afins, tais como definidas no art.6º do DL 243/67 e seus parágrafos.

2. Atividade Correlata - toda ação, operação ou trabalho destinado a apoiar ou implementar um serviço cartográfico ou de natureza cartográfica, tal como mencionada no parágrafo único do art.2º do Decreto-Lei número 243167.

II- Quanto à finalidade:

1. Norma Cartográfica Brasileira - NCB-xx - denominação genérica atribuída a todo e qualquer documento normativo, homologado pela COCAR, integrando a Coletânea Brasileira de Normas Cartográficas.

2. Norma Técnica para Cartas Gerais - NCB-Gx - documento normativo elaborado pelos órgãos previstos nos incisos 1 e 2 do 51º do artigo 15 do Decreto-Lei nº 243/67.

3. Norma Técnica para Cartas Náuticas - NCB-NM - documento normativo elaborado pelo órgão competente do Ministério da Marinha, na forma do art.15 do DL 243/67.

4. Norma Técnica para Cartas Aeronáuticas - NCB-AV - documento normativo elaborado pelo órgão competente do Ministério da Aeronáutica na forma do art.15 do DL 243/67.

5. Norma Técnica para Cartas Temáticas - NCB-Tx - documento normativo elaborado pelo órgão público federal interessado, conforme com petência atribuída pelo art.15 do DL 243/67.

6. Norma Técnica para Cartas Especiais - NCB-Ex - documento normativo elaborado pelo órgão público federal interessado, conforme competência atribuída pelo art.15 do DL 243/67.

7. Norma Cartográfica Geral - NCB-Cx - documento normativo de caráter geral, não incluído na competência prevista no art.15 do DL 243/6 elaborado pela Comissão de Cartografia ou por integrante do Sistema Cartográfico Nacional, aprovado e homologado pela COCAR.

8. Prática Recomendada pela COCAR - PRC-XX - especificação, procedimento ou trabalho decorrente de pesquisa, sem força de norma porém considerado e homologado pela COCAR como útil e recomendável contendo citação obrigatória da autoria, incluída na Coletânea Brasileira de Normas Cartográficas.

III- Quanto à natureza:

1. Norma Cartográfica de Padronização - documento normativo destinado ao estabelecimento de condições a serem satisfeitas, uniformizando as características físicas, geométricas e geográficas dos componentes, parâmetros e documentos cartográficos.

2. Norma Cartográfica de Classificação - documento normativo destinado a designar, ordenar, distribuir ou subdividir conceitos ou objetos.

3. Norma Cartográfica de Terminologia - documento normativo destinado a definir, relacionar ou conceituar termos e expressões técnicas, visando o estabelecimento de uma linguagem uniforme.

4. Norma Cartográfica de Simbologia - documento normativo destinado a estabelecer símbolos e abreviaturas, para a representação gráfica de acidentes naturais e artificiais.

5. Norma Cartográfica de Especificação - documento normativo destinado a estabelecer condições exigíveis para execução, aceitação ou recebimento de trabalhos cartográficos, observados os padrões de precisão exigidos.

6. Norma Cartográfica de Procedimento - documento normativo destinado a estabelecer condições:

- a) para execução de projetos, serviços e cálculos;
- b) para emprego de instrumental, material e produtos decorrentes;
- c) para elaboração de documentos cartográficos;
- d) para segurança no uso de instrumental, instalações e execução de projetos e serviços.

7. Norma Cartográfica de Método de Ensaio ou Teste - documento normativo destinado a prescrever a maneira de verificar ou determinar características, condições ou requisitos exigidos de:

- a) material ou produto, segundo sua especificação;
- b) serviço cartográfico, obra, instalação, segundo o respectivo projeto;
- c) método ou área de teste ou padronização, segundo suas finalidades e especificação.

8. Norma Geral - é a que, por sua natureza, abrange mais de um dos tipos anteriores.

Art.6º: As Normas Cartográficas que não se enquadrem nas disposições do art.15 do DL 243/67, serão estabelecidas pela Comissão de Cartografia - COCAR, por proposta apresentada em Plenário ou através da Secretaria-Executiva da COCAR.

Art.7º: As cartas em escalas superiores a 1/25.000 terão articulação, formato e sistema de projeção regulados por norma própria, nos termos do art.15 do DL 243/67.

Parágrafo único: Tratando-se de grandes áreas ou extensas regiões, as cartas de que trata o presente artigo terão tratamento sistemático, observadas as normas a respeito.

CAPÍTULO II

Especificações Gerais:

Seção 1 - Classificação de uma carta quanto a exatidão

Art.8º: As cartas quanto à sua exatidão devem obedecer ao Padrão de Exatidão Cartográfica - PEC, segundo o critério abaixo indicado:

1. Noventa por cento dos pontos bem definidos numa carta, quando testados no terreno, não deverão apresentar erro superior ao Padrão de Exatidão Cartográfica - Planimétrico estabelecido.

2. Noventa por cento dos pontos isolados de altitude, obtidos por interpolação de curvas-de-nível, quando testados no terreno, não deverão apresentar erro superior ao Padrão de Exatidão Cartográfica - Altimétrico estabelecido.

§1º Padrão de Exatidão Cartográfica é um indicador estatístico de dispersão, relativo a 90% de probabilidade, que define a exatidão de trabalhos cartográficos.

§2º A probabilidade de 90% corresponde a 1,6449 vezes o Erro Padrão - PEC = 1,6449 EP.

§3º O Erro-Padrão isolado num trabalho cartográfico, não ultrapassará 60,8% do Padrão de Exatidão Cartográfica.

§4º Para efeito das presentes Instruções, consideram-se equivalentes as expressões Erro-Padrão, Desvio-Padrão e Erro-Médio-Quadrático.

Seção 2 - Classes de cartas

Art.9º: As cartas, segundo sua exatidão, são classificadas nas Classes A, B e C, segundo os critérios seguintes:

Classe A:

1. Padrão de Exatidão Cartográfica - Planimétrico: 0,5 mm, na escala da carta, sendo de 0,3 mm na escala da carta o Erro-Padrão correspondente.

2. Padrão de Exatidão Cartográfica - Altimétrico: metade da equidistância entre as curvas-de-nível, sendo de um terço desta equidistância o Erro-Padrão correspondente.

Classe B:

1. Padrão de Exatidão Cartográfica - Planimétrico: 0,8 mm na escala da carta, sendo de 0,5 mm na escala da carta o Erro-Padrão correspondente.

2. Padrão de Exatidão Cartográfica - Altimétrico: três quintos da equidistância entre as curvas-de-nível, sendo de dois quintos o Erro-Padrão correspondente.

Classe C:

1. Padrão de Exatidão Cartográfica - Planimétrico: 1,0 mm na escala da carta, sendo de 0,6 mm na escala da carta o Erro-Padrão correspondente.

2. Padrão de Exatidão Cartográfica - Altimétrico: três quartos da equidistância entre as curvas-de-nível, sendo de metade desta equidistância o Erro-Padrão correspondente.

Art.10: É obrigatória a indicação da Classe no rodapé da folha, ficando o produtor responsável pela fidelidade da classificação.

Parágrafo único: Os documentos cartográficos, não enquadrados nas classes especificadas no artigo anterior, devem conter no rodapé da folha a indicação obrigatória do Erro-Padrão verificado no processo de elaboração.

Art.11: Nenhuma folha de carta será produzida a partir da ampliação de qualquer documento cartográfico.

§1º Excepcionalmente, quando isso se tornar absolutamente necessário, tal fato deverá constar explicitamente em cláusula contratual no termo de compromisso.

§2º Uma carta nas condições deste artigo será sempre classificada com exatidão inferior à do original, devendo constar obrigatoriamente no rodapé a indicação "Carta ampliada a partir de (documento cartográfico) em escala (... tal)".

§3º Não terá validade legal para fins de regularização fundiária ou de propriedade imóvel, a carta de que trata o "caput" do presente artigo.

CAPITULO III

Elementos Obrigatórios de uma Carta:

Art.12: A folha de uma carta deve ser identificada pelo índice de nomenclatura e número do mapa-índice da série respectiva, bem como por um título correspondente ao topônimo representativo do acidente geográfico mais importante da área.

Art.13: Cada carta deve apresentar, no rodapé ou campos marginais, uma legenda com símbolos e convenções cartográficas, de acordo com a norma respectiva.

Parágrafo único: O rodapé e campos marginais devem conter as informações prescritas nas normas relativas à carta em questão, apresentando, no mínimo, os elementos prescritos nestas Instruções.

Art.14: A escala numérica, bem como a escala gráfica da carta, devem ser apresentadas sempre acompanhadas de indicação da equidistância entre as curvas-de-nível e escala de declividade, de acordo com a norma respectiva.

Art.15: Os referenciais planimétrico e altimétrico do sistema de projeção utilizado devem ser citados, bem como as suas constantes, a convergência meridiana, a

declinação magnética para o ano de edição e sua variação anual, de acordo com a norma respectiva.

Art.16: O relevo deve ser apresentado por curvas-de-nível, ou hachuras, ou pontos-cotados, ou em curvas-de-nível com pontos-cotados, segundo as normas relativas à carta em questão, admitindo-se, quando for o caso o relevo sombreado como elemento subsidiário.

Art.17: A quadriculação quilométrica ou sexagesimal, ou ambas, devem ser usadas, com apresentação das coordenadas geodésicas dos quatro cantos da folha, de acordo com a norma respectiva.

Art.18: O esquema de articulação das folhas adjacentes, bem como um diagrama da situação da folha no Estado, na região ou no país, devem ser usados conforme a escala e de acordo com a norma respectiva.

Art.19: É obrigatória a citação do ano de edição, bem como das datas de tomada de fotografias, trabalhos de campo e restituição, ou compilação, citando-se os órgãos executores das diversas fases.

Parágrafo único: Nas cartas produzidas por compilação é obrigatória a citação da fonte e do órgão produtor dos documentos de natureza cartográfica, utilizados em sua elaboração.

Art.20: Nas unidades de medida, deve ser adotado o Sistema Internacional de Unidades - SI, nos termos da Legislação Metrológica Brasileira.

Parágrafo único: Em casos especiais e para atender compromissos internacionais, admite-se o uso de unidades de medida estrangeiras, devendo constar, neste caso, a unidade usada, em lugar bem visível e destacado na carta.

CAPÍTULO IV

Do Sistema Geodésico Brasileiro:

Art.21: Os referenciais planimétrico e altimétrico para a Cartografia Brasileira são aqueles que definem o Sistema Geodésico Brasileiro, conforme estabelecido nas "Especificações e Normas Gerais para Levantamentos Geodésicos - IBGE - 1983".

§1º Segundo aquelas normas, o referencial planimétrico coincide com o Sistema Geodésico Sul-americano de 1969 (SAD-69).

§2º O referencial altimétrico coincide com o nível médio do mar na baía de Imbituba, no litoral de Santa Catarina.

Art.22: A título precário, admite-se documentação cartográfica à base do antigo Sistema Geodésico Córrego Alegre.

CAPITULO V

Especificações Gerais das Normas Cartográficas Brasileiras:

Art.23: As entidades responsáveis pelo estabelecimento de normas cartográficas obedecerão, em sua apresentação, ao prescrito nestas Instruções Reguladoras.

Parágrafo único: As entidades que, em virtude de acordo internacional ou norma interna específica, devam usar forma e estilo próprios, poderão fazê-lo, obedecida a conceituação prevista nestas Instruções.

Art.24: Uma Norma Cartográfica Brasileira será constituída de Identificação, elementos preliminares, texto e informações complementares.

Art.25: A identificação deve abranger: título e tipo, conforme definido no art.5º; identificação da instituição que elabora a norma; ano de publicação, classificação e numeração.

Art.26: O título deve ser tão conciso quanto o permitam a clareza e distinção, observadas as diretrizes da Comissão de Cartografia - COCAR, estabelecidas através de Resolução.

Art.27: O texto deve conter as prescrições da norma, apresentando-se subdividido em capítulos, seções e eventualmente alíneas e sub-alíneas, e incluindo, quando necessário, figuras, tabelas, notas e anexos.

Paragrafo único: A Comissão de Cartografia - COCAR regulará, através de Resolução, a estrutura do texto das Normas Cartográficas Brasileiras, bem como sua capitulação e apresentação gráfica.

Art.28: A redação de normas tem estilo próprio, linguisticamente correto, sem preocupações literárias e tanto quanto possível uniforme. A qualidade essencial é a clareza do texto, para evitar interpretações ambíguas.

Art.29: As unidades e a grafia de números e símbolos a serem utilizadas nas normas serão as previstas na Legislação Metrológica Brasileira.

Parágrafo único: As normas que, em virtude de acordo internacional, devam usar unidades estranhas à Legislação Metrológica Brasileira deverão fazê-las acompanhar, entre parênteses, das unidades legais brasileiras equivalentes.

CAPITULO VI

Disposições Finais:

Art.30: O Sistema Cartográfico Nacional deverá adaptar-se, no prazo de um ano, aos padrões estabelecidos neste Decreto.

Art.31: No prazo de um ano, a contar da publicação do presente Decreto, as entidades responsáveis pela elaboração de normas cartográficas deverão remetê-las à Comissão de Cartografia - COCAR.

Parágrafo único: O prazo de que trata este artigo poderá ser prorrogado, mediante resolução da COCAR, para atender pedido fundamentado de entidade interessada.

Art.32: Este Decreto entra em vigor na data de sua publicação, revogadas as disposições em contrário.

Brasília, 20 de junho de 1984; 163º da Independência e 96º da República.

JOAO FIGUEIREDO e DELFIM NETTO

Publicada no D.O.U. de 22-06-84.

ANEXO II - TABELA T-STUDENT

gl/P	0,90	0,80	0,70	0,60	0,50	0,40	0,30	0,20	0,10	0,05	0,02	0,01	0,001
01	0,158	0,325	0,510	0,727	1,000	1,376	1,963	3,078	6,314	12,708	31,821	63,657	636,619
02	0,142	0,289	0,445	0,617	0,816	1,061	1,386	1,886	2,920	4,303	6,965	9,925	31,598
03	0,137	0,277	0,424	0,584	0,765	0,978	1,250	1,638	2,353	3,182	4,541	5,541	12,924
04	0,134	0,271	0,414	0,569	0,741	0,941	1,190	1,533	2,132	2,776	3,747	4,604	8,610
05	0,132	0,267	0,408	0,559	0,727	0,920	1,156	1,476	2,015	2,571	3,365	4,032	6,869
06	0,131	0,265	0,404	0,553	0,718	0,906	1,134	1,440	1,943	2,447	3,143	3,707	5,959
07	0,130	0,263	0,402	0,549	0,711	0,896	1,119	1,415	1,895	2,365	2,985	3,499	5,408
08	0,130	0,262	0,399	0,546	0,706	0,889	1,108	1,397	1,880	2,306	2,896	3,355	5,041
09	0,129	0,261	0,398	0,543	0,703	0,883	1,100	1,383	1,833	2,262	2,821	3,250	4,781
10	0,129	0,260	0,397	0,542	0,700	0,879	1,093	1,372	1,812	2,228	2,764	3,169	4,587
11	0,129	0,260	0,396	0,540	0,697	0,876	1,088	1,363	1,796	2,201	2,718	3,106	4,437
12	0,128	0,259	0,395	0,539	0,695	0,873	1,083	1,356	1,782	2,179	2,681	3,055	4,318
13	0,128	0,259	0,394	0,538	0,694	0,870	1,079	1,350	1,771	2,160	2,650	3,012	4,221
14	0,128	0,258	0,393	0,537	0,692	0,868	1,076	1,345	1,761	2,145	2,624	2,977	4,140
15	0,128	0,258	0,393	0,536	0,691	0,866	1,074	1,341	1,753	2,131	2,602	2,947	4,073
16	0,128	0,258	0,392	0,535	0,690	0,865	1,071	1,337	1,746	2,120	2,583	2,921	4,015
17	0,128	0,257	0,392	0,534	0,689	0,863	1,069	1,333	1,740	2,110	2,567	2,898	3,965
18	0,127	0,257	0,392	0,534	0,688	0,862	1,067	1,330	1,734	2,101	2,552	2,878	3,922
19	0,127	0,257	0,391	0,533	0,688	0,861	1,066	1,328	1,729	2,093	2,539	2,861	3,883
20	0,127	0,257	0,391	0,533	0,687	0,860	1,064	1,325	1,725	2,086	2,528	2,845	3,850
21	0,127	0,257	0,391	0,532	0,686	0,859	1,063	1,323	1,721	2,080	2,518	2,831	3,819
22	0,127	0,256	0,390	0,532	0,686	0,858	1,061	1,321	1,717	2,074	2,508	2,819	3,792
23	0,127	0,256	0,390	0,532	0,685	0,858	1,060	1,319	1,714	2,069	2,500	2,807	3,767
24	0,127	0,256	0,390	0,531	0,685	0,857	1,059	1,318	1,711	2,064	2,492	2,797	3,745
25	0,127	0,256	0,390	0,531	0,684	0,856	1,058	1,316	1,708	2,060	2,485	2,787	3,726
26	0,127	0,256	0,390	0,531	0,684	0,856	1,058	1,315	1,706	2,056	2,479	2,779	3,707
27	0,127	0,256	0,389	0,531	0,684	0,856	1,057	1,314	1,703	2,052	2,473	2,771	3,690
28	0,127	0,256	0,389	0,530	0,683	0,856	1,056	1,313	1,701	2,048	2,467	2,763	3,674
29	0,127	0,256	0,389	0,530	0,683	0,854	1,055	1,311	1,699	2,045	2,462	2,756	3,659
30	0,127	0,256	0,389	0,530	0,683	0,854	1,055	1,310	1,697	2,042	2,457	2,750	3,646
40	0,126	0,255	0,388	0,529	0,681	0,851	1,050	1,303	1,684	2,021	2,423	2,704	3,551
60	0,126	0,254	0,387	0,527	0,679	0,848	1,046	1,296	1,671	2,000	2,390	2,660	3,460
120	0,126	0,254	0,386	0,526	0,677	0,845	1,041	1,289	1,658	1,980	2,358	2,617	3,373
i	0,126	0,253	0,385	0,524	0,674	0,842	1,038	1,282	1,645	1,960	2,326	2,576	3,291

ANEXO III - DISTRIBUIÇÃO QUI-QUADRADO

Distribuição do Qui-Quadrado - χ^2_n

Os valores tabelados correspondem aos pontos x tais que: $P(\chi^2_n \leq x)$

n	$P(\chi^2_n \leq x)$													
	0,005	0,01	0,025	0,05	0,1	0,25	0,5	0,75	0,9	0,95	0,975	0,99	0,995	
1	3,93E-05	0,000157	0,000982	0,003932	0,016	0,102	0,455	1,323	2,706	3,841	5,024	6,635	7,879	1
2	0,010	0,020	0,051	0,103	0,211	0,575	1,386	2,773	4,605	5,991	7,378	9,210	10,597	2
3	0,072	0,115	0,216	0,352	0,584	1,213	2,366	4,108	6,251	7,815	9,348	11,345	12,838	3
4	0,207	0,297	0,484	0,711	1,064	1,923	3,357	5,385	7,779	9,488	11,143	13,277	14,860	4
5	0,412	0,554	0,831	1,145	1,610	2,675	4,351	6,626	9,236	11,070	12,832	15,086	16,750	5
6	0,676	0,872	1,237	1,635	2,204	3,455	5,348	7,841	10,645	12,592	14,449	16,812	18,548	6
7	0,989	1,239	1,690	2,167	2,833	4,255	6,346	9,037	12,017	14,067	16,013	18,475	20,278	7
8	1,344	1,647	2,180	2,733	3,490	5,071	7,344	10,219	13,362	15,507	17,535	20,090	21,955	8
9	1,735	2,088	2,700	3,325	4,168	5,899	8,343	11,389	14,684	16,919	19,023	21,666	23,589	9
10	2,156	2,558	3,247	3,940	4,865	6,737	9,342	12,549	15,987	18,307	20,483	23,209	25,188	10
11	2,603	3,053	3,816	4,575	5,578	7,584	10,341	13,701	17,275	19,675	21,920	24,725	26,757	11
12	3,074	3,571	4,404	5,226	6,304	8,438	11,340	14,845	18,549	21,026	23,337	26,217	28,300	12
13	3,565	4,107	5,009	5,892	7,041	9,299	12,340	15,984	19,812	22,362	24,736	27,688	29,819	13
14	4,075	4,660	5,629	6,571	7,790	10,165	13,339	17,117	21,064	23,685	26,119	29,141	31,319	14
15	4,601	5,229	6,262	7,261	8,547	11,037	14,339	18,245	22,307	24,996	27,488	30,578	32,801	15
16	5,142	5,812	6,908	7,962	9,312	11,912	15,338	19,369	23,542	26,296	28,845	32,000	34,267	16
17	5,697	6,408	7,564	8,672	10,085	12,792	16,338	20,489	24,769	27,587	30,191	33,409	35,718	17
18	6,265	7,015	8,231	9,390	10,865	13,675	17,338	21,605	25,989	28,869	31,526	34,805	37,156	18
19	6,844	7,633	8,907	10,117	11,651	14,562	18,338	22,718	27,204	30,144	32,852	36,191	38,582	19
20	7,434	8,260	9,591	10,851	12,443	15,452	19,337	23,828	28,412	31,410	34,170	37,566	39,997	20
21	8,034	8,897	10,283	11,591	13,240	16,344	20,337	24,935	29,615	32,671	35,479	38,932	41,401	21
22	8,643	9,542	10,982	12,338	14,041	17,240	21,337	26,039	30,813	33,924	36,781	40,289	42,796	22
23	9,260	10,196	11,689	13,091	14,848	18,137	22,337	27,141	32,007	35,172	38,076	41,638	44,181	23
24	9,886	10,856	12,401	13,848	15,659	19,037	23,337	28,241	33,196	36,415	39,364	42,980	45,558	24
25	10,520	11,524	13,120	14,611	16,473	19,939	24,337	29,339	34,382	37,652	40,646	44,314	46,928	25
26	11,160	12,198	13,844	15,379	17,292	20,843	25,336	30,435	35,563	38,885	41,923	45,642	48,290	26
27	11,808	12,878	14,573	16,151	18,114	21,749	26,336	31,528	36,741	40,113	43,195	46,963	49,645	27
28	12,461	13,565	15,308	16,928	18,939	22,657	27,336	32,620	37,916	41,337	44,461	48,278	50,994	28
29	13,121	14,256	16,047	17,708	19,768	23,567	28,336	33,711	39,087	42,557	45,722	49,588	52,335	29
30	13,787	14,953	16,791	18,493	20,599	24,478	29,336	34,800	40,256	43,773	46,979	50,892	53,672	30
40	20,707	22,164	24,433	26,509	29,051	33,660	39,335	45,616	51,805	55,758	59,342	63,691	66,766	40
50	27,991	29,707	32,357	34,764	37,689	42,942	49,335	56,334	63,167	67,505	71,420	76,154	79,490	50
60	35,534	37,485	40,482	43,188	46,459	52,294	59,335	66,981	74,397	79,082	83,298	88,379	91,952	60
70	43,275	45,442	48,758	51,739	55,329	61,698	69,334	77,577	85,527	90,531	95,023	100,425	104,215	70
80	51,172	53,540	57,153	60,391	64,278	71,145	79,334	88,130	96,578	101,879	106,629	112,329	116,321	80
90	59,196	61,754	65,647	69,126	73,291	80,625	89,334	98,650	107,565	113,145	118,136	124,116	128,299	90
100	67,328	70,065	74,222	77,929	82,358	90,133	99,334	109,141	118,498	124,342	129,561	135,807	140,170	100

ANEXO IV - ORTOFOTOCARTA DA ÁREA DE ESTUDO